



Kalle Aromaa

Bitumin vanhenemisen ja elvyttämisen vaikutukset sen reologisiin ominaisuuksiin

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Espoossa 2.2.2016

Valvoja: Professori Terhi Pellinen

Ohjaajat: Diplomi-insinööri Timo Blomberg

Diplomi-insinööri Katri Eskola

Tekijä Kalle Aromaa

Työn nimi Bitumin vanhenemisen ja elvyttämisen vaikutukset sen reologisiin ominaisuuksiin

Koulutusohjelma Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan koulutusohjelma

Pää-/sivuaaine Liikenne- ja tietekniikka

Koodi R3004

Työn valvoja professori Terhi Pellinen

Työn ohjaajat diplomi-insinööri Timo Blomberg ja diplomi-insinööri Katri Eskola

Päivämäärä 2.2.2016

Sivumäärä 111+17

Kieli suomi

Tiivistelmä

Diplomityön tavoitteena oli selvittää, miten bitumisen sideaineen vanheneminen ja vanhentuneen sideaineen elvyttäminen pehmeällä bitumilla muuttavat bitumin reologisia ominaisuuksia sekä miten näitä ominaisuuksien muutoksia voidaan todentaa ja arvioida reologisten parametrien avulla. Diplomityö tehtiin täydentämään Liikenneviraston Aalto-yliopistossa teettämää tutkimusta asfaltin uusiokäytöstä. Työ oli pääasiassa sideainetutkimus ja tutkimuksessa käytettävä aineisto koostui Vt 1:lle vuonna 2013 tehdyn Rem-kunnossapitotoimenpiteen yhteydessä poratuista ja kerätyistä näytteistä uutetusta bitumista. Bitumin reologisia ominaisuuksia mitattiin leikkausreometrillä (DSR) taajuuspyyhkäisyssä sekä ns. LAS- ja MSCR-testeillä. Lisäksi tehtiin perinteiset luokitte-lutestit, tunkeuma ja Fraass-murtumispiste.

Taajuuspyyhkäisytestissä mitatuilla kompleksimoduulilla (G^*) ja vaihekulmalla (δ) pystyttiin kuvaamaan tarkasti bitumissa tapahtuvia reologisten ominaisuuksien muutoksia eri lämpötiloissa ja kuormitusajoilla. Tunkeuma-arvojen ja reometrillä mitattujen parametrien (G^* ja δ) välille saatiin myös vahva korrelaatio, R^2 -arvot olivat 0,988 ja 0,953. Koska tutkitut bitumit olivat modifioimattomia ja lämpötilaherkkydeltään samanlaisia, ei tuloksia voida kuitenkaan suoraan yleistää muille bitumilaaduille. Taajuuspyyhkäisyssä saatujen parametrien avulla voitiin laskea myös ns. G-R-vaurioparametri, jolla voidaan ennustaa bitumin vanhenemisen aiheuttamaa päällysteen vaurioitumista, kuten päällysteen purkautumista ja verkkohalkeilua. Vastaava alustava raja-arvo bitumin tunkeumalle olisi alle 22.

Elvyttimen lisäys paransi vanhentuneen bitumin reologisia ominaisuuksia pienentämällä kompleksimoduuliarvoja sekä nostamalla tunkeumaa ja suurentamalla vaihekulmia. Keskeisenä päätelmänä tutkimuksessa voitiin kuitenkin todeta, että elvyttämällä asfalttipäällystettä pehmeällä tiebitumilla (650/900) ei bitumin vanhenemisesta johtuvia ominaisuuksien muutoksia ollut mahdollista palauttaa nykyisin käytettävillä elvytin-määrillä alkuperäisiksi eikä elvytinmäärää voitu lisätä Rem-toimenpiteen aiheuttamien päällysteen tilavuussuhteiden muutosten vuoksi. Jotta elvyttäminen voisi onnistua tavoitteissaan, suositellaan elvytintyyppin vaihtamista viskositeetiltaan alempaan elvytin-tyyppiin, kuten vielä pehmeämpiin bitumilaatuihin V1500 ja V3000.

Vaikka elvyttimen käytöllä pystyttiin parantamaan vanhentuneen sideaineen reologisia ominaisuuksia, eivät vaihekulman ja kompleksimoduulin muutokset tapahtuneet samassa suhteessa. Tuloksista oli havaittavissa, että vaikka elvyttämällä pystyttäisiinkin palauttamaan bitumin jäykkyys takaisin alkuperäiseksi, bitumi jäisi silti alkuperäisiä ominaisuuksiaan elastisemmaksi. Tällöin elvytettyjen näytteiden virtaus- ja relaksaatio-ominaisuudet jäisivät heikommiksi kuin tuoreen bitumin.

Avainsanat bitumin vanheneminen, elvyttäminen, reologia, G-R-parametri, DSR

Author Kalle Aromaa		
Title of thesis The effects of ageing and rejuvenation on bitumen rheology		
Degree programme Transportation and Environmental Engineering		
Major/minor Transportation and Highway Engineering		Code R3004
Thesis supervisor Professor Terhi Pellinen		
Thesis advisor(s) M.Sc. (tech) Timo Blomberg and M.Sc. (tech) Katri Eskola		
Date 2.2.2016	Number of pages 111+17	Language Finnish

Abstract

The aim of this master's thesis was to investigate the effects of bitumen ageing and rejuvenation on its rheology and how these effects can be verified and evaluated by using rheological parameters. The thesis was commissioned by the Finnish Transport Agency as a part of the research on recycling of asphalt pavements. Tested materials were cored and collected during the maintenance of pavement by the hot in-place recycling (HIPR) on Highway no. 1 in 2013. The rheological properties of the extracted bitumens were measured by the dynamic shear rheometer (DSR) employing the frequency sweep, LAS and MSCR tests. In addition the conventional classification tests, penetration and Fraass breaking point were conducted.

Complex modulus (G^*) and phase angle (δ) obtained from the frequency sweep test were found to be adequate parameters to characterize the changes in the rheological properties of bitumen at different temperatures and loading times. A good correlation between these parameters (G^* and δ) and Penetrations (R^2 -values were 0,988 and 0,953) was observed. However, it is important to note that the study bitumens were all unmodified and had same similar temperature susceptibility. Therefore, the results cannot be directly generalized to other types of bitumens. The typical rheological analysis was extended by comparison with Glover-Rowe damage parameter and a good correlation between field performance and laboratory data was found. A criterion for fatigue and cracking damage such as raveling would translate to the penetration value less than 22.

Adding soft bitumen (650/900) as a rejuvenator to the aged binder was found to improve the rheological properties of bitumen by decreasing complex modulus values and increasing phase angle and penetration values. However, the amount of rejuvenator used was found to be insufficient for restoring the properties of the field aged bitumen to those of the Rolling Thin Film Oven Test aged virgin bitumen, which was set as a target value. It was not possible to add enough rejuvenator due to the bleeding of the binder caused by voids overfilled with bitumen. In order to achieve the target stiffness values, it is recommended to change the rejuvenator type to have softer bitumen grades of V1500 or V3000.

Although the rejuvenator managed to improve the rheological properties of aged bitumen, it was found that the effects deviated for the complex modulus and phase angle. Results suggested that although the stiffness of the bitumen could be restored by using soft bitumen (650/900) as a rejuvenator, the treatment could not restore the balance between the viscous and elastic response of the bitumen and the rejuvenated bitumen would be more elastic. This transformation is most likely to influence also the flow and relaxation properties of the rejuvenated binder.

Keywords bitumen ageing, bitumen rejuvenation, rheology, G-R-parameter, DSR

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Aalto-yliopiston Insinööritieteiden korkeakoulun Liikenne- ja tietekniikan tutkimusryhmässä. Haluan kiittää työn tilaajaa Liikennevirastoa mahdollisuudesta työskennellä mielenkiintoisen ja ajankohtaisen aiheen parissa.

Työn valvojana toimi professori Terhi Pellinen ja haluan kiittää häntä asiantuntevasta ja tinkimättömästä ohjauksesta ja neuvoista diplomityön tekovaiheessa sekä koko opiskeluaikani. Haluan kiittää Terhiä myös haastavista työtehtävistä, joita olen hänen alaisuudessaan saanut. Niillä on ollut suuri panos oman ammattitaidon lisäyksessä. Työn ohjaajina toimivat Nynas Oy:lta juuri eläkkeelle jäänyt diplomi-insinööri Timo Blomberg sekä Liikennevirastolta diplomi-insinööri Katri Eskola. Haluan kiittää molempia ohjaajiani asiantuntevasta ja rakentavasta ohjauksesta koko työn aikana. Timoa haluan erityisesti kiittää halusta lähteä vielä ohjaamaan työtäni eläkepäivillä. Hänen panoksensa asiasisällön oikeellisuudessa on ollut merkittävä. Katria haluan erityisesti kiittää näkökulman antamisesta tilaajan kannalta, jonka olen toivottavasti pystynyt välittämään myös työhön.

Haluan kiittää kaikkia Tielaboratoriossa mittauksiin osallistuneita ja erityisesti laboratoriomestari Heli Nikiforowia ja Petri Peltosta sekä jatko-opiskelija Michalina Makowskaa, joiden panos mittausten tekemisessä on ollut suuri. Haluan kiittää Michalinaa myös kaikesta avusta ja ohjauksesta, joita olen työn aikana häneltä saanut. Kiitos kuuluu myös diplomi-insinööri Olli-Ville Laukkaselle hänen panoksestaan ja neuvoistaan työn reometrimittauksissa. Erityiskiitos myös TkT Jarkko Valtoselle, joka auttoi työn kielellisen ulkoasun parantamisessa.

Tietekniikan tutkimusryhmä on tarjonnut hyvän ja mukavan työ- ja oppimisympäristön viimeisen kahden vuoden aikana. Työtehtäviä on ollut monenlaisia ja viimeisen reilun vuoden aikana olen perehtynyt bitumin reometrillä suoritettaviin mittauksiin, mikä on antanut myös mahdollisuuden ja pohjan tämän diplomityön tekemiselle. Haluan kiittää kaikkia työkavereita, joiden kanssa olen päässyt tekemään yhdessä hommia. Teidän kanssanne on ollut ilo työskennellä.

Lopuksi haluan vielä kiittää perhettäni sekä ystäviäni, jotka ovat tukeneet minua läpi koko tämän pitkän projektin.

Espoossa 2.2.2016

Kalle Aromaa

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo	5
Merkinnät	6
1 Johdanto	7
1.1 Työn taustaa	7
1.2 Tutkimusongelma	8
1.3 Tutkimuksen tavoitteet ja hypoteesi	9
1.4 Aineisto ja tutkimusmenetelmät	9
1.5 Tutkimuksen raja	9
2 Bitumisen sideaineen ominaisuuksia	11
2.1 Yleistä bitumista	11
2.2 Bitumin reologiset ominaisuudet	12
2.2.1 Viskoelastisuuden määritelmä	12
2.2.2 Viruminen ja relaksaatio	14
2.2.3 Dynaamis-mekaaninen analyysi (DMA)	18
2.2.4 Aika-lämpötila-superpositioperiaate	22
2.2.5 Bitumin reologisten ominaisuuksien graafinen esittäminen	25
2.2.6 Modifioimattoman bitumin reologisia ominaispiirteitä	28
2.3 Bitumisen sideaineen vanheneminen	29
2.3.1 Vanhenemisen syntytavat	29
2.3.2 Vanhenemisen vaikutukset reologiaan ja päällysteen kestävyys	32
2.4 Vanhentuneen bitumin elvyttäminen	35
3 Laboratoriotutkimukset	40
3.1 Tutkimusaineisto ja tutkimusmenetelmät	40
3.2 Näytteenotto sekä tutkitut materiaalit	43
3.3 Tutkimusmenetelmien kuvaus	44
3.3.1 Perinteiset mittausten menetelmät	44
3.3.2 Reologiset mittaukset	46
4 Tutkimustulokset ja niiden tarkastelu	51
4.1 Perinteiset mittaukset	51
4.2 Reologiset parametrit lineaarisella alueella taajuuspyyhkäisyssä	58
4.3 Väsymis- ja deformaatiokestävyyden reologiset parametrit	63
5 Taajuuspyyhkäisymittausten perustarkastelu	67
5.1 Haihdutuksessa jääneen liuottimen vaikutus	67
5.2 Uutetun bitumin määrän vaikutus mittaustuloksiin	69
5.3 Perinteiset vs. reometrimittaukset	72
5.4 Muutokset lämpötilan suhteen	74
5.5 Vanhenemisindeksit	82
5.6 Jäykkyys-elastisuus-suhteen muutos	88
6 Taajuuspyyhkäisymittausten jatkotarkastelu	92
6.1 G-R-parametri	92
6.2 Relaksaatiomoduuli	95
7 Pohdintaa	97
8 Yhteenveto, päätelmät ja suositukset	102
Lähdeluettelo	105
Liitteet	111

Merkinnät

A	[-]	LAS-testissä käytetty parametri
B	[-]	LAS-testissä käytetty parametri
C ₁	[-]	ensimmäinen WLF-kerroin
C ₂	[K]	toinen WLF-kerroin
E	[Pa = N/m ²]	kimmomoduuli
E _R (t)	[Pa]	relaksaatiomoduuli veto-puristussuunnassa
G	[Pa]	liukumoduuli
G(t, T)	[Pa]	jäykkyysmoduuli leikkaussuunnassa
G(t)	[Pa]	relaksaatiomoduuli leikkaussuunnassa
G*	[Pa]	kompleksinen leikkausmoduuli / kompleksimoduuli
G'	[Pa]	varastomoduuli
G''	[Pa]	häviömoduuli
G-R	[Pa]	G-R-väsymisvaurioparametri
N _f	[-]	LAS-testissä laskettu väsymisvaurioparametri
S(t, T)	[Pa]	jäykkyysmoduuli veto-puristussuunnassa
T	[°C]	lämpötila
a _T	[-]	aika-lämpötila-superpositioperiaatteessa käytetty vaakasuuntainen siirtokerroin
f	[Hz = 1/s]	taajuus
i	[-]	imaginaariyksikkö, $i = \sqrt{-1}$
t	[s]	aika
tan(δ)	[-]	häviökerroin
γ	[-]	leikkausmuodonmuutos oskilloivassa mittauksessa / liukuma
γ ₀	[-]	leikkausmuodonmuutoksen amplitudi oskilloivassa mittauksessa
γ*	[-]	kompleksinen leikkausmuodonmuutos oskilloivassa mittauksessa
γ _{max}	[%]	LAS-testissä käytetty oletettu päällysteen maksimivenymä tietyllä päällysterakenteella
γ̇(t)	[s ⁻¹]	leikkauksenopeus oskilloivassa mittauksessa
δ	[°] tai [rad]	vaihekulma tai vaihesiirtymä
ε	[-]	muodonmuutos veto-puristussuunnassa / venymä
η	[Pa s]	viskositeetti
η*	[Pa s]	kompleksinen viskositeetti
η'	[Pa s]	dynaaminen viskositeetti /kompleksisen viskositeetin reaaliosa
η''	[Pa s]	kompleksisen viskositeetin imaginaariosa
ν	[-]	Poissonin vakio
σ	[Pa]	vetojännitys
τ	[Pa]	leikkausjännitys
τ ₀	[Pa]	leikkausjännityksen amplitudi oskilloivassa mittauksessa
τ*	[Pa]	kompleksinen leikkausjännitys oskilloivassa mittauksessa
ω	[rad/s]	kulmataajuus, $\omega=2\pi f$

1 Johdanto

1.1 Työn taustaa

Luonnonvarojen ja energian säästäminen ovat asfalttialalla olleet jo pidemmän aikaa tärkeässä roolissa. Energiakriisi 1970-luvulla aiheutti ensimmäisen sysäyksen asfaltin kierrätykselle sekä uusiokäytölle, kun kehittyneissä maissa ryhdyttiin kehittämään erilaisia asfaltin kierrätystekniikoita, jotka mahdollistaisivat vanhan asfaltin uusiokäytön (Karlsson ja Isacson 2006). Kehitystyö jatkuu edelleen ja tavoitteena on jopa sadan prosentin kierrätettävyys.

Suomessa asfaltin uusiokäytön hyödyt ovat merkittävät. Nastarenkaista johtuva tien urautuminen aiheuttaa varsinkin vilkasliikenteisillä teillä tarpeen asfalttipäällysteen uusimiseen lyhyin kunnossapitajaksoin ja päätiet asfaltoidaan noin 6-7 vuoden välein. Toisaalta lyhyt kunnossapitajakso edesauttaa kierrätettävyyttä, koska asfalttipäällyste ei ole vanhentunut liiallisesti ja on vielä käyttökelpoista ja massan uusiokäyttäminen on todettu kannattavaksi. (Apilo ja Eskola 1999, Rantanen ja Suikki 2009).

Yleinen Suomessa käytetty uusiopäällystemenetelmä varsinkin vilkkaasti liikennöidyillä maanteilla on Rem-toimenpide (Rem), jossa koko prosessi tehdään tien päällä (PTL 2012). Aluksi vanha asfalttipinta lämmitetään kuumajärsittävään lämpötilaan kuumentimien avulla, minkä jälkeen vanha massa järsitään irti. Vanhaan massa ruiskutetaan elvytintä, minkä jälkeen massa sekoitetaan uuden lisäasfalttimassan kanssa ja levitetään takaisin tielle sekä lopuksi tiivistetään. Lisämassaa lisätään tien kulumisen mukaan noin 15...25 kg/m², mikä normaalisti on vain 20 prosenttia koko uudesta kulutuskerroksesta. (Tielaitos 1997).

Suomessa Rem-menetelmä yleistyi 1990-luvun alussa ja nykyään lähes puolet kaikista maanteiden vuosittaisista päällysteiden ylläpidon toimenpiteistä tehdään Rem-menetelmän sovelluksilla (Rem, Ura-Rem, Remo) (Hänninen 2013). Menetelmän yleistyessä Rem-toimenpiteen vaikutuksia päällysteen laatuun ja kestävyYTEEN alettiin myös tutkia (mm. Patosalmi 1996, Apilo ja Eskola 1999, Rantanen ja Suikki 2009). Tutkimusten perusteella laadittiin tämän hetken toimintamalli, joka rajoittaa uudesta massasta tehdyn laatan tai massapintauksen Rem-toimenpiteiden käsittelykertojen määrän kahteen kertaan peräkkäin, minkä jälkeen kulutuskerroksen asfalttimassa pitää kokonaan uusia. Elvyttimenä on myös käytettävä aina samaa pehmeää bitumilaatua 650/900.

Rem-toimenpiteen laajempaa käyttöä rajoittaa asfaltin sideaineena olevan bitumin vanheneminen. Bitumin vanhenemisessa bitumi kovettuu ja haurastuu pääasiassa hapettumalla, jolloin bitumin reologiset ominaisuudet muuttuvat (Karlsson ja Isacson 2006). Bitumin reologiset ominaisuudet eli virtausominaisuudet kuvaavat asfalttipäällysteen kykyä kestää toistuvaa liikennekuormitusta vaurioitumatta (Wastimo 1995). Korkeat lämpötilat sekä UV-säteily kiihdyttävät hapettumisprosessia (Karlsson ja Isacson 2006). Bitumin vanhenemista tapahtuu siis korkeissa lämpötiloissa valmistusvaiheessa sekä Rem-toimenpiteen yhteydessä, mutta myös tien käyttöaikana. Elvyttämisen tarkoituksena on palauttaa vanhentuneen bitumin ominaisuuksia takaisin alkuperäisiksi tai lähes alkuperäisiksi lisäämällä kovempaan vanhentuneeseen bitumiin esimerkiksi pehmeämpää bitumia (650/900). Useat peräkkäiset Rem-toimenpiteet sekä pitkä käyttöikä saattavat kuitenkin tehdä asfalttipäällysteen bitumista jo niin kovaa, ettei elvyttäminen enää pysty palauttamaan bitumia tarpeeksi pehmeäksi ainakaan nykyisin käytössä olevalla elvytin-bitumilla (650/900).

Bitumi on viskoelastinen ja termoplastinen materiaali eli sen reologiset ominaisuudet riippuvat merkittävästi lämpötilasta sekä kuormitusajasta (Shell Bitumen 1990, Blomberg 1990). Tällaista monimutkaista materiaalin käyttäytymistä voidaan kuvata parhaiten erilaisilla oskilloivilla- tai viruma- ja relaksaatiotesteillä. Dynaamisella leikkausreometrillä voidaan mitata ja tutkia materiaalin reologisia ominaisuuksia nimenomaan erilaisilla lämpötila-alueilla sekä kuormitusajoilla (Merzger 2014). Valitettavasti tällainen bitumin käyttäytymisen täydellinen kuvaaminen on työlästä, aikaa vievää sekä kallista. Maailmalla onkin kehitetty useita erilaisia matemaattisia malleja sekä yhtälöitä, joilla pyritään kuvaamaan ja ennustamaan bitumisen sideaineen reologisia ominaisuuksia koko viskoelastisella alueella (Yusoff ym. 2011).

Liikennevirasto aloitti vuonna 2013 Aalto-yliopiston kanssa viisivuotisen tutkimusprojektin asfalttipäällysteen uusiokäytön kehittämistä Rem-menetelmällä. Tutkimus on osa *Elinkaaritehokas tiepäällyste* tutkimusprojektia ja tutkimuksen tavoitteena on lisätä uusiopäällysteiden käyttöä päällysteiden ylläpidossa kehittämällä kohdesuunnittelua sekä menetelmän käyttöä. Käytännön toimenpiteenä halutaan mahdollistaa useamman kuin kahden Rem-toimenpideterran peräkkäinen käyttö vähentämällä tähän liittyviä ongelmia ja rajoituksia. Kohdesuunnittelu- ja ennakkotutkimusmenetelmien kehittämällä tavoitteena on varmistaa tehokkuus menetelmän käytössä tierakenteen elinkaaren aikana. Rem-tutkimuksen ensimmäiseksi koekohteeksi valittiin Vt 1, jossa Rem-kunnossapitotoimenpide tehtiin 26,5 km matkalla syksyllä 2013. Tutkimus on tarkemmin esitelty lähteessä (Makowska ja Pellinen 2016). Tämän diplomityön tutkimusaineisto on peräisin ko. koekohteesta.

1.2 Tutkimusongelma

Bitumin elvytyksessä tavoitteena on palauttaa sideaineen ominaisuudet halutuiksi. Usein pyrkimyksenä on elvyttää vanhentunutta bitumia niin, että päästään mahdollisimman lähelle bitumin alkuperäisiä ominaisuuksia. Elvytetyn sideaineen tavoiteominaisuus voidaan valita eri tavoin ja Suomessa tavoiteltavana arvona käytetään usein alkuperäisen tuoreen sideainebitumin tunkeumaa mitattuna lämpötilassa 25 °C, joka kuvaa bitumin jäykkyyttä keskimääräisessä käyttölämpötilassa. Verrattaessa materiaalien ominaisuuksia vain yhdessä lämpötilassa ei välttämättä kuitenkaan saavuteta parasta mahdollista lopputulosta ajatellen Suomen ilmastoa ja lämpötilavaihteluja vuodenaikojen vaihtuessa.

Blomberg ym. (2016) tutkivat laboratorio-oloissa, miten bitumin reologiset ominaisuudet muuttuvat vanhentamalla ja elvyttämällä alkuperäistä bitumia useita kertoja peräkkäin. Kokeissa havaittiin, että bitumin viskoelastisuus (elastisuus-viskoosisuus-suhde) ja samalla lämpötilaherkkyys muuttuvat alkuperäisestä, vaikka jäykkyys pysyisi samana. Bitumin vanhentuessa siitä tulee elastisempaa ja pehmeällä bitumilla elvytys ei näyttäisi palauttavan bitumin virtavuutta eli viskoosisuutta. Jos virtausominaisuudet eivät palaudu, herää kysymys pystyykö elvytetty bitumi relaksoimaan jännityksiä samalla tavalla kuin tuore bitumi.

Kun lämpötila laskee talvella ja bitumi kutistuu, kutistuminen aiheuttaa vetojännityksiä asfalttimassassa. Jos syntyvät vetojännitykset ylittävät massan lujuuden, asfalttiin syntyy pakkashalkeamia. Pehmeämpi elastinen bitumi sallii suuremmat muodonmuutokset, mutta jännitykset eivät relaksoitu yhtä nopeasti kuin vastaavassa jäykkyydessä olevassa viskoosisemmassa bitumissa. Vastaavasti, jos korkeassa lämpötilassa bitumi on hyvin kovaa, mutta elastista, se vastustaa muodonmuutosta varastoituvan energian avulla, mutta kun jännitykset ylittävät materiaalin lujuuden, syntyy halkeamia. Nämä hal-

keamat eivät kuitenkaan korjautu itsestään auringon lämmittäessä päällystettä, kuten tapahtuisi viskoosisemmassa materiaalissa, joka vastustaa muodonmuutosta virtaamalla.

1.3 Tutkimuksen tavoitteet ja hypoteesi

Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää, miten bitumisen sideaineen vanheneminen ja vanhentuneen sideaineen elvyttäminen pehmeällä bitumilla muuttavat bitumin reologisia ominaisuuksia sekä miten näitä ominaisuuksien muutoksia voidaan todentaa ja arvioida reologisten parametrien avulla.

Työn hypoteesina oli, että vanheneminen muuttaa bitumin viskoelastisia ominaisuuksia tehden siitä elastisempaa, eikä elvyttämällä pehmeällä lisäbitumilla pystytä palauttamaan tätä muutosta, vaikka bitumin jäykkyys pystyttäisiinkin palauttamaan. Jos bitumin virtausominaisuuksia ei pystytä palauttamaan, on kyseenalaista voidaanko elvytystä tehdä pehmeällä bitumilla vai pitääkö elvytintyyppiä vaihtaa.

1.4 Aineisto ja tutkimusmenetelmät

Tässä tutkimuksessa käytettävä aineisto koostui Vt 1:ltä vuonna 2013 poratuista ja kerätyistä näytteistä uutetusta bitumista. Päällysteen Rem-käsittelykerrat vaihtelivat yhdestä kolmeen. Tutkimuksessa tieltä porattiin neljältä eri alueelta yhteensä 165 poranäytepalaa, joista saatiin uutettuja bituminäytteitä yhteensä 54. Lisäksi jokaiselta neljältä alueelta kerättiin myös asfalttirouhenäyte. Tätä diplomityötä varten näistä 54 poranäytteestä reometriajot tehtiin 38 bituminäytteelle. Lisäksi diplomityössä analysoitavaan aineistoon kuului myös neljä asfalttirouhenäytteestä uutettua bitumia sekä kolme referenssinäytettä eli yhteensä tutkittavien bituminäytteiden määrä oli 45.

Työn laboratoriotutkimus painottui bituminäytteiden reologisten ominaisuuksien määrittelyyn, joten mittauslaitteena käytettiin dynaamista leikkausreometria (Dynamic Shear Rheometer = DSR). Reometria käytetään materiaalin viskoelastisten ominaisuuksien tutkimiseen leikkausjännitysten ja muodonmuutosten avulla. Laitteella voidaan havaita muutoksia materiaaliominaisuuksissa myös eri lämpötila-alueilla sekä kuormitusajoilla. Bituminäytteille tehtiin myös perinteiset bitumitestit tunkeuma ja Fraass-murtumispiste, joiden arvoja on myös verrattu reometrillä saatuihin tuloksiin.

Tässä tutkimuksessa reometrillä ajettut mittaustestit olivat taajuuspyyhkäisy, LAS-testi sekä MSCR-testi.

- Taajuuspyyhkäisyssä tutkitaan bitumin lämpötila- ja aikariippuvaista muodonmuutoskäyttäytymistä lämpötilavälillä 0-90 °C (Mezger 2014).
- LAS-testillä (Linear Amplitude Sweep) pyritään kuvaamaan bitumin viskoelastista väsymistä ja kestävyyttä. Mittaus tehtiin standardiluonnoksesta (AASHTO TP 101-12) poiketen 10 °C lämpötilassa.
- MSCR-testillä (Multiple Stress Creep Recovery) pyritään kuvaamaan bitumin deformaatiokestävyyttä. Mittaus tehtiin standardiluonnoksesta (AASHTO 70-11) poiketen 50 °C lämpötilassa.

1.5 Tutkimuksen rajaus

Tässä tutkimuksessa keskitytään ainoastaan bitumin ominaisuuksien tutkimiseen tieoloissa, joissa kaikkia muuttujia ei voida kontrolloida samalla tavalla kuin laboratoriossa. Koetiellä oli vain yksi bitumilaji, modifioimaton 70/100 tiebitumi, jota käytettiin sideaineena lisämassassa. Alkuperäisestä asfalttimassan sideaineesta ei ollut saatavilla

tietoa, mutta sen oletettiin myös olevan 70/100 tiebitumia. Tutkimuksessa oli vain yksi elvytintyyppi, joka oli pehmeä bitumi 650/900.

Näytteet otettiin vain yhdeltä tieltä (Vt 1), joten työssä tutkittiin vain yhden urakoitsijan yhdeltä kohteelta saatua aineistoa. Diplomityössä käydään vain pintapuolisesti läpi itse Rem-toimenpide ja näytteenotto. Ne on selitetty tarkemmin lähteessä (Makowska ja Pellinen 2016).

Tämän diplomityön tuloksia hyödynnetään *Elinkaaritehokas tiepäällyste* Rem-projektissa, jonka tavoitteena on antaa suosituksia peräkkäisten Rem-toimenpidekertojen määrästä ja asiaan ei vielä oteta kantaa. Diplomityö toimii siten lähtötietona bitumin ominaisuuksien ja niiden muutosten tarkastelulle, minkä perusteella työn tavoitteita ja tuloksia voidaan tarkastella osana Rem-projektin kokonaisuutta.

2 Bitumisen sideaineen ominaisuuksia

2.1 Yleistä bitumista

Bitumi on pääosin hiilivedyistä tai sen johdannaisista koostuva musta tai erittäin tumma, huoneen lämpötilassa jähmeä tai puolijähmeä materiaali, joka liukenee tolueniin. Bitumia saadaan raakaöljyn jalostuksessa maaöljyn tislauksen pohjatuotteena tai suoraan luonnon asfalttiesiintymistä.

Reologia on tieteenala, joka tutkii materiaalin virtausominaisuuksia ja muodonmuutoksia. Bitumin molekyylien kemiallinen koostumus sekä rakenne määräävät sen reologiset ominaisuudet kussakin lämpötilassa ja muutokset koostumuksessa tai rakenteessa näkyvät myös muutoksina reologiassa.

Bitumi on kemialliselta rakenteeltaan erittäin monimutkainen lukemattomien erilaisten hiilivetymolekyylien sekä niihin kiinnittyneiden erilaisten heteroatomien seos. Koostumukseltaan bitumi sisältää keskimäärin hiiltä (82–88 %) ja vetyä (8–11 %) sekä raakaöljyn lähteen mukaan rikkiä (0–6 %), happea (0–1,5 %) ja typpeä (0–1 %). Bitumissa voi lisäksi olla erittäin pieniä määriä metalleja, kuten vanadiinia, nikkeliä, rautaa, magnesiumia ja kalsiumia. (Traxler 1936, Blomberg 1990, Shell Bitumen 1990).

Erittäin monimutkaisen ja -muotoisen rakenteensa takia bitumille ei ole yksiselitteistä mallia, joten bitumi jaetaan erilaisilla jako- eli fraktiointimenetelmillä komponentteihin ominaispiirteidensä, kuten liukoisuuden tai molekyylipainon avulla. Yleisesti bitumi jaetaan neljään kemiallista luonnetta kuvaavaan ryhmään eli SARA-fraktioihin, jotka ovat tyydyttyneet öljyt (Saturates), aromaattiset öljyt (Aromatics), hartsit (Resins) sekä asfalteenit (Asphaltenes). (Corbett 1969, Blomberg 1990, Shell Bitumen 1990). Yleisesti voidaan sanoa, että kun siirrytään tyydyttyneistä öljyistä asfalteeneihin, aromaattisuus, poolisuus, molekyylipaino ja heteroatomien määrä kasvavat. Olennaista on kuitenkin tiedostaa, että eri jakomenetelmät tuottavat erilaisia fraktioita, ryhmien välillä on päällekkäisyyksiä ja kukin fraktio on vain hieman pienempi seos mitä erilaisimpia yhdisteitä eivätkä ne siis edusta puhdasta kemiallista aineryhmää (Blomberg 1990).

Bitumin varsinaiselle rakenteelle on esitetty useita erilaisia rakennemalleja, joita on esitelty lähteessä (Lesueur 2009). Bitumin rakennetta on mm. kuvattu misellimallilla. Käsityksen mukaan bitumi koostuu hyvin erilaisen liukoisuusparametrin omaavista molekyyleistä, jotka eivät välttämättä ole liukoisia toisiinsa. Koska eri molekyylien liukoisuusparametrit (liukoisuus/liuotuskyky) muodostavat jatkumon äärilaidasta toiseen, mahdollistaa se kaikkien molekyylien pysymisen liuenneina bitumissa. (Blomberg 1990, Shell Bitumen 1990).

Bitumin fysikaaliset ja erityisesti mekaaniset ominaisuudet määräytyvät suurelta osin bitumin reologisesta käyttäytymisestä. Bitumi on termoplastinen ja viskoelastinen neste, joka on matalissa lämpötiloissa ja/tai lyhyillä kuormitusajoilla elastinen ja hauras kiinteä aine, kun taas korkeissa lämpötiloissa ja/tai pitkillä kuormitusajoilla viskoosi neste. Väliin jäävällä alueella bitumi käyttäytyy ääripäidensä sekoituksena viskoelastisena materiaalina, jolla on sekä elastisia että viskooseja piirteitä. Bitumin mekaaniset ominaisuudet, kuten esimerkiksi jännityksen aiheuttama vaikutus bitumiin, riippuvat siis merkittävästi sekä lämpötilasta että kuormitusajasta. (Airey 1997, Blomberg 1990).

Bitumin monimutkaisia materiaaliominaisuuksia on pyritty kuvaamaan ja luokittelemaan erilaisilla yksinkertaisilla empiirisillä testeillä, kuten murtumispiste-, tunkeuma-,

pehmenemispiste- sekä viskositeettitesteillä. Näiden testien tarkoituksena on myös antaa bitumin käyttäytymisestä olennaista tietoa asfalttipäällysteen käytön kannalta kriittisissä lämpötiloissa. Fraass-murtumispisteellä (SFS-EN 12593) pyritään kuvaamaan bitumin haurautta alhaisissa lämpötiloissa, joissa päällysteen pakkashalkeilu on ongelmana. Tunkeuma-testillä (SFS-EN 1426) kuvataan bitumin kovuutta ja konsistenssia 25 °C:ssa, eli päällysteen normaalissa keskimääräisessä käyttölämpötilassa. Koska bitumilla ei ole tarkkaa sulamispistettä, pehmenemispiste-testi (SFS-EN 1427) on kehitetty kuvaamaan bitumin pehmenemistä lämpötila-alueella, jossa päällysteen deformaatio saattaa nousta ongelmaksi tai kattobitumin kyseessä ollessa se valuisi kaltevalla tasolla. Lämpötilan edelleen noustessa bitumin virtaaminen lisääntyy ja se muuttuu vähitellen nestemäisemmäksi, jolloin sitä kuvataan viskositeetin avulla. Viskositeetti kuvaa aineen kykyä vastustaa virtaamista ja bitumin korkeiden lämpötilojen viskositeetin mittaukseen käytetään perinteisesti kapillaariviskometriä (SFS-EN 12595). Viskositeetit mitataan standardien mukaisesti 135 ja 60 °C:ssa kuvaamaan bitumin juoksevuutta ja työnettävyyttä asfalttimassan valmistus- sekä tiivistyslämpötiloissa. (Blomberg 1990, Bahia 2009).

Suomessa bitumien laatuvaatimukset asfalttipäällysteen sideaineina perustuvat Eurooppalaisiin SFS-EN-tuotestandardeihin. Bitumien luokittelu perustuu joko tunkeuman tai viskositeetin mukaan määriteltäviin raja-arvoihin. Normaaleilla ja pehmeillä tiebitumeilla lajimerkintänä käytetään tunkeuma-alueen ala- ja ylärajaa (esimerkiksi 70/100), kun taas pehmeät viskositeettiluokitellut bitumit nimetään kirjaimella V sekä keskimääräisellä kinemaattisen viskositeetin arvolla 60 °C:ssa (esimerkiksi V1500). (PANK ry 2011).

Ongelmana edellä esitetyissä testeissä on, että ne ovat yksittäisiä pistemittauksia, jotka eivät anna kokonaisvaltaista tietoa bitumin reologisesta käyttäytymisestä. Eri empiiristen mittaustulosten yhdistelmänä on kehitetty myös bitumin lämpötilaherkkyyttä kuvaavia parametreja kuten penetraatioindeksi PI (Blomberg 1990, Shell Bitumen 1990). Tosin nämäkään parametrit eivät ota huomioon materiaalin aikariippuvuutta. Testit ja niiden tulokset ovat luonteiltaan lisäksi empiirisiä, minkä perusteella materiaalin fysikaalista ominaisuutta kuvaavien suureiden johtaminen teorioiden perusteella ei ole eksaktia. (Bahia 2009, Airey 1997).

2.2 Bitumin reologiset ominaisuudet

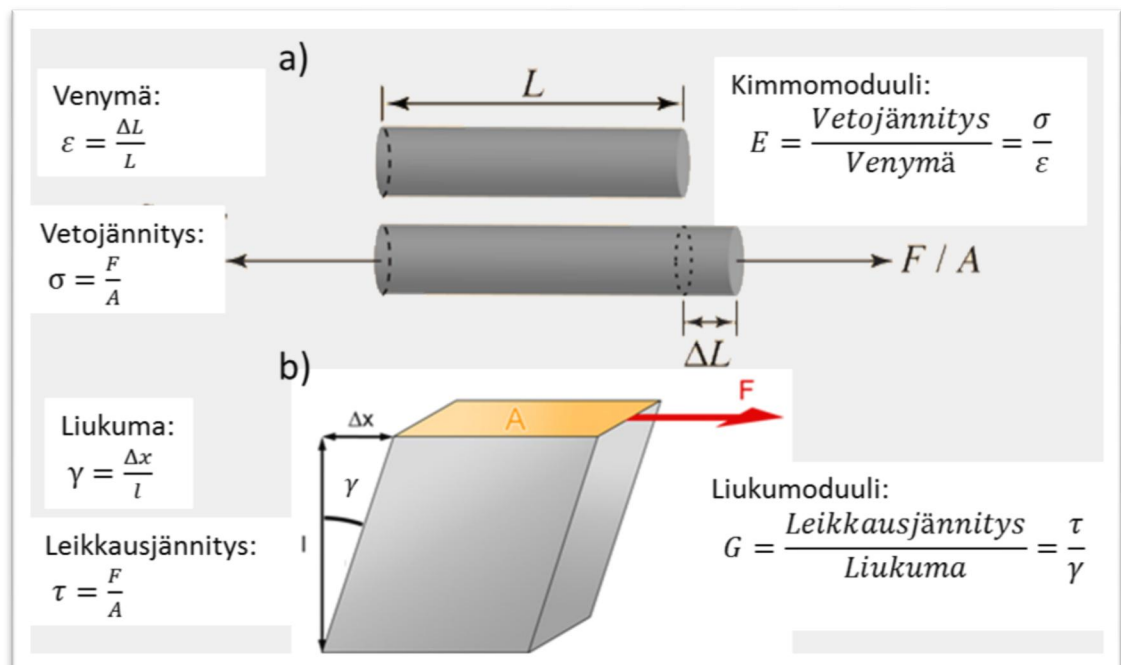
2.2.1 Viskoelastisuuden määritelmä

Bitumi on termoplastinen neste, joka käyttäytyy viskoelastisesti. Bitumin viskoelastisilla ominaisuuksilla tarkoitetaan sen ajasta riippuvia mekaanisia ominaisuuksia kuormitustilanteessa. Bitumin termoplastisuudella taas tarkoitetaan, että bitumin mekaaniset ominaisuudet muuttuvat lämpötilan vaikutuksesta. Bitumi voi lämpötilan ja kuormitusajan mukaan muuttua mekaanisilta ominaisuuksiltaan kiinteästä elastisesta aineesta juoksevaan viskoosiin nesteeseen. Alhaisissa lämpötiloissa tai lyhyillä kuormitusajoilla bitumi on kiinteä aine, johon sovelletaan kiinteän aineen mekaniikkaa ja kimmomodulia. Kuormitettaessa elastista, lineaarisesti kimmoisaa materiaalia tapahtuu välitön muodonmuutos, joka palautuu nopeasti kokonaan kuormituksen päätyttyä (Macosko 1994). Korkeissa lämpötiloissa tai hyvin pitkillä kuormitusajoilla bitumi taas käyttäytyy newtonilaisen nesteen tavoin. Kuormitettaessa viskoosia newtonilaista nestettä palautumaton muodonmuutos tapahtuu lineaarisesti ajan suhteen (Macosko 1994). Normaaleissa päällysteen käyttölämpötiloissa bitumi on viskoelastisella alueella, joten se käyttäytyy samanaikaisesti sekä elastisesti että viskoosisti. Tällä viskoelastisella alueella materiaa-

liin kohdistuva kuorma aiheuttaa muodonmuutoksen, joka riippuu sekä kuormituksen ajasta että lämpötilasta. (Airey 1997, Blomberg 1990).

Näin monimutkaisen materiaalin mekaanisia ominaisuuksia kuormitustilanteessa pitää tutkia ainakin kahdella eri tavalla, jotta koko viskoelastinen käyttäytyminen voidaan tunnistaa. Se, kuinka paljon materiaali vastustaa muodonmuutosta kuormitustilanteessa sekä missä suhteessa kuormituksessa tapahtuva materiaalikäyttäytyminen on elastista eli palautuvaa tai viskoosia eli palautumatonta. (Bahia 2009).

Van der Poel esitti viskoelastisten ominaisuuksien määrittämiseksi vuonna 1954 kattavasti bitumin mekaanisia ominaisuuksia kuvaavan parametrin nimeltä jäykkyysmoduuli. Moduulin määrittely on analoginen kiinteän aineen kimmomoduliin. Lineaarisesti kimmoisalla alueella olevan kiinteän, elastisen materiaalin moduulit on määriteltä kuvassa 1 sekä veto-puristus- että leikkaussuunnassa. Malli on esitetty myös mm. lähteissä (Shell Bitumen 1990 ja Blomberg 1990).



Kuva 1. Elastisen materiaalin moduulit määritettyinä a) veto-puristussuunnassa sekä b) leikkaussuunnassa.

Täysin elastisella materiaalilla kimmo- sekä liukumoduuli ovat riippumattomia materiaaliin kohdistetusta kuormitusajasta ja niiden välillä on yhteys:

$$E = 2(1 + \nu)G. \quad (1)$$

Kaavassa ν kuvaa Poissonin vakiota, joka kuvaa materiaalin kokoonpuristuvuutta. Modifioimaton puhdas bitumi ajatellaan kokoonpuristumattomaksi nesteeksi, jolloin $\nu=0,5$ eli saadaan:

$$E = 3G. \quad (2)$$

Van der Poelin kehittämä jäykkyysmoduuli määritellään kuten kimmomodulikin, mutta se on sekä lämpötilan että kuormitusajan funktio:

$$S(t, T) = \frac{\sigma}{\varepsilon(t, T)}, \quad (3)$$

jossa S = jäykkyysmoduuli [Pa]
 t = aika [s]
 T = lämpötila [$^{\circ}\text{C}$].

Bitumin jäykkyysmoduuli mitataan yleensä leikkaussuunnassa tapahtuvien jännitysten ja muodonmuutosten avulla, jolloin puhutaan yleensä leikkausmoduulista $G(t, T)$, jonka suuruus vastaavalla tavalla riippuu sekä ajasta että lämpötilasta. Sama kaavan 2 yhteys on voimassa myös viskoelastisille materiaaleille eli:

$$S(t, T) = 3G(t, T). \quad (4)$$

Määrittäessä elastista, viskoosia tai viskoelastista käyttäytymistä oletetaan, että muodonmuutos tietyllä kuormitusajalla sekä lämpötilalla on suoraan verrannollinen kuormituksen eli jännityksen suuruuteen. Tällöin materiaali on lineaarisesti viskoelastisella alueella (LVE-alue) ja viskoelastista käyttäytymistä voidaan kuvata lineaarisilla yhtälöillä. Bitumin LVE-alueella jännityksen ja muodonmuutoksen välinen riippuvuus eli jäykkyysmoduuli määräytyy vain ajasta ja lämpötilasta, ja on siis riippumaton jännityksen tai muodonmuutoksen suuruudesta. Silloin, kun bitumin viskoelastisella alueella aiheutettu jännitys tai muodonmuutos kasvaa tietyn arvon yli, siirrytään epälineaariselle alueelle, jolloin materiaalin viskoelastisten ominaisuuksien määrittäminen vaikeutuu vielä huomattavasti. (Van der Poel 1954, Airey 1997).

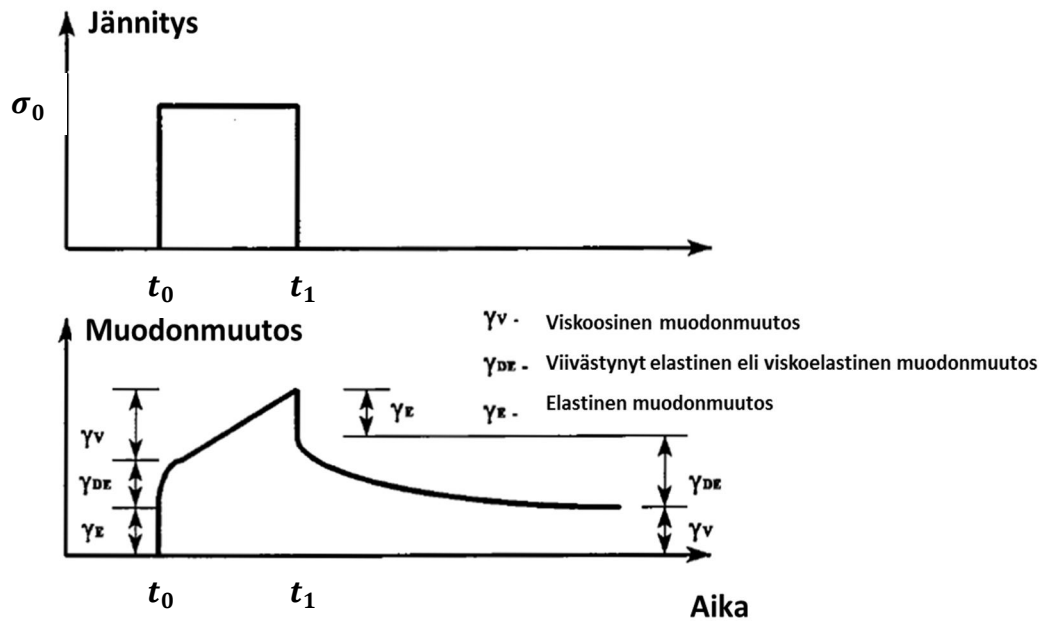
Materiaalin viskoelastinen käyttäytyminen tulee parhaiten esille fenomenologisten eli ilmiöpohjaisten ajasta riippuvien materiaalimallien avulla. Kolme parhaiten viskoelastista käyttäytymistä kuvaavaa testiä ovat viruminen (engl. creep), relaksaatio (engl. relaxation) sekä dynaaminen eli jaksollinen kuormitus, joita käsitellään tarkemmin seuraavissa luvuissa.

2.2.2 Viruminen ja relaksaatio

Viruminen

Viruma- sekä viruma-palautumatestillä voidaan kuvata ja tutkia materiaalin viskoelastista käyttäytymistä. Materiaalin virumisella tarkoitetaan vakiojännityksellä tapahtuvaa hidasta muodonmuutosta ajan suhteen, mikä on tunnusomaista viskoelastiselle materiaalille. (Airey 1997, Blomberg 1990, Merzger 2014).

Viskoelastisen materiaalin käyttäytyminen kuormitustilanteessa on esitetty kuvassa 2. Kuormittamalla materiaalia siihen aiheutetaan äkillinen jännitys σ_0 hetkellä t_0 , joka pidetään vakiona hetkeen t_1 asti, jolloin jännityksen aiheuttama kuormitus lopetetaan.

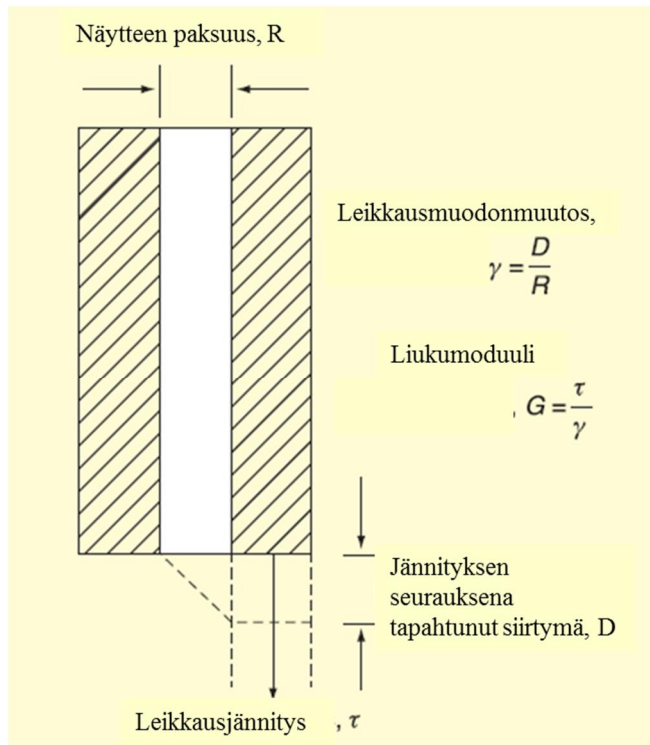


Kuva 2. Viskoelastisen materiaalin käyttäytyminen kuormituksessa sekä kuormituksen vapautuksessa, kun kuormitusjännitys on vakio. (Muokattu lähteestä Airey 1997)

Materiaalin käyttäytyminen kuormitustilanteessa voidaan jakaa elastiseen, viivästyneeseen elastiseen sekä viskoosiseen käyttäytymiseen. Kuormituksen alkaessa bitumin elastinen osuus aiheuttaa välittömän muodonmuutoksen, joka myös palautuu välittömästi kuormituksen poistuttua. Lisäksi bitumiin alkaa muodostua myös kuormitusajasta riippuvaa jatkuvaa muodonmuutosta, joka koostuu viskoosista sekä viivästyneestä elastisesta muodonmuutoksesta. Kuormituksen lakattua viivästynyt elastinen muodonmuutos palautuu ajan myötä, kun taas viskoosi muodonmuutos jää pysyväksi. (Blomberg 1990).

Näiden kolmen komponentin suhteelliset osuudet muodonmuutoksesta riippuvat jäykkyyden tapaan sekä kuormitusajan kestosta että lämpötilasta. Kylmissä lämpötiloissa sekä lyhyillä kuormitusajoilla elastinen osuus on vallitseva, kun taas korkeissa lämpötiloissa sekä pitkällä kuormitusajoilla vallitseva muodonmuutos on viskoosia eli palautumatonta virumista. (Airey 1997, Blomberg 1990).

Bitumin jäykkyyttä voidaan mitata leikkaussuunnassa tapahtuvalla virumatestillä esimerkiksi kuvan 3 mukaisella tavalla. Testin alussa materiaaliin kohdistetaan vakiosuuruinen leikkausjännitys, jonka seurauksena materiaaliin alkaa syntyä leikkausmuodonmuutosta. Tämän muodonmuutoksen kasvua mitataan pitkän ajan kuluessa (testiaika yleensä välillä $1-10^5$ s), minkä perusteella materiaalin jäykkyys (tässä tapauksessa liukumoduuli G) erilaisilla kuormitusajoilla voidaan laskea. (Shell Bitumen 1990). Virumatestin heikkous on, ettei sillä saada tietoa materiaalin käyttäytymisestä lyhyillä kuormitusajoilla (alle 1s) eikä sillä voida erotella elastista ja viskoosia materiaaliominaisuutta toisistaan (Airey 1997).



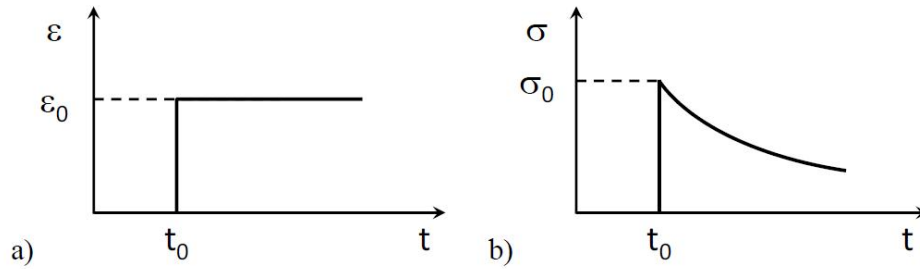
Kuva 3. Bitumin virumatesti leikkaussuunnassa. (Muokattu lähteestä Shell Bitumen 2003)

Virumisen vaikutus voidaan havaita päällysteen deformaatiourautumisessa. Deformaatiourautuminen on bitumisen päällysteen palautumatonta muodonmuutosta, jota syntyy korkeissa päällysteen käyttölämpötiloissa toistuvista raskaan liikenteen aiheuttamista kuormituksista. Deformaatiossa raskas ajoneuvo aiheuttaa päällysteeseen kuormituksen, joka taas aiheuttaa päällysteen bitumiin muodonmuutoksen. Jos päällysteen lämpötila on korkea sekä raskaan ajoneuvon kuormitusaika on pitkä (eli ajoneuvo ajaa hitaasti tai on paikoillaan), käyttäytyy päällysteessä oleva bitumi pehmeämmin ja viskoosemmin, jolloin bitumissa alkaa tapahtua virumista, jonka seurauksena osa kuormituksesta aiheutuvasta muodonmuutoksesta on palautumatonta. Tällainen palautumaton muodonmuutos aiheuttaa uran syntymisen päällysteessä renkaan alla ja kasvaa kumulatiivisesti toistuvilla kuormituksilla. (Shell Bitumen 1990, Bahia 2009).

Bitumin kestävyyttä deformaatiourautumista vastaan voidaan kuvata esimerkiksi toistuvilla viruma-palaumatestillä eli MSCR-testillä (Multiple Stress Creep Recovery). Testissä sideainetta kuormitetaan ja annetaan palautua useita kertoja peräkkäin ja tuloksena lasketaan sideaineen palautumattoman myötäämisen määrä sekä keskimääräinen palautumaprosentti. (AASHTO TP 70-11, Shenoy 2008).

Relaksaatio

Materiaalin viskoelastisuutta voidaan tutkia ja mitata myös jännitysrelaksaation avulla. Bitumiin aiheutettu muodonmuutos saa aikaan aina jännityksen materiaalissa ja kun muodonmuutos pidetään vakiosuuruisena, viskoelastinen materiaali pyrkii relaksoimaan syntynyttä jännitystä kuvan 4 mukaisella tavalla. (Blomberg 1990, Merzger 2014).



Kuva 4. Viskoelastisen materiaalin relaksaatio, kun a) muodonmuutos pidetään vakiona, jolloin b) jännitys alkaa laskea ajan kuluessa. (Muokattu lähteestä Mangiafico 2014)

Puhtaasti viskoosilla nesteellä muodonmuutoksesta aiheutuva jännitys relaksoituu välittömästi muodonmuutoksen saavutettua vakioarvonsa, kun taas täysin elastinen materiaali ei relaksoi jännitystä lainkaan. Viskoelastisella materiaalilla jännityksen relaksoitumisesta vastaavat siis materiaalin viskoosiset virtausominaisuudet, jotka pyrkivät purkamaan materiaaliin syntyneitä jännitystiloja. (Macosko 1994, Blomberg 1990). Modifioimaton tuore bitumi ajatellaan viskoelastiseksi nesteeksi, joka pystyy pitkän ajan kuluessa relaksoimaan syntyneet jännitykset kokonaan.

Kun bitumiin aiheutetut muodonmuutokset ovat tarpeeksi pieniä, on relaksaation ja muodonmuutoksen suuruuden välillä lineaarinen riippuvuus, joka riippuu ainoastaan muodonmuutoksen kestoajasta ja puhutaan lineaarisesta viskoelastisuudesta (LVE). Jännityksen relaksoitumista ajan suhteen kuvataan usein relaksaatiomoduulin avulla, joka on määritelty seuraavasti:

$$E_R(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0}, \quad (5)$$

jossa E_R = relaksaatiomoduuli [Pa]
 $\sigma(t)$ = muodonmuutoksen aiheuttama jännitys, joka pienenee [Pa]
 ε_0 = materiaaliin aiheutettu muodonmuutos [-]
 t = kulunut aika muodonmuutoksen alkamisesta [s]

Kun liikutaan pienillä muodonmuutoksilla, relaksaatiomoduuli on riippumaton muodonmuutoksesta, joten moduulikäyrät ovat yhteneviä. Muodonmuutoksen kasvaessa suureksi bitumin käyttäytyminen muuttuu epälineaariseksi, jolloin relaksaatiomoduuli riippuu myös muodonmuutoksen suuruudesta. (Macosko 1994, Blomberg 1990).

Vaikka relaksaatiomoduulia kuvataan yleensä vain ajan suhteen, vaikuttaa bitumissa sen suuruuteen myös lämpötila. Kun bitumi on korkeammissa lämpötiloissa, se on pehmeämpi ja enemmän viskoosi, jolloin se relaksoi jännityksiä huomattavasti nopeammin kuin kun bitumi on kylmemmissä lämpötiloissa, jolloin se on jäykempi ja elastisempi. Kylmemmissä lämpötiloissa jäykempään bitumiin kohdistuu tietyllä muodonmuutoksella myös suuremmat jännitystilat. (Bahia 2009).

Jännitysrelaksaation vaikutus bitumin viskoelastisiin ja termoplastisiin ominaisuuksiin voidaan havaita esimerkiksi päällysteen pakkashalkeilussa. Ilman ja samalla asfalttipäällysteen kylmeneminen alhaisiin lämpötiloihin aiheuttaa bitumiin ja päällysteeseen lämpökutistumista, joka taas synnyttää materiaaliin paikallisia jännitystiloja. Viskoelastisena materiaalina bitumi pyrkii relaksoimaan ja vapauttamaan näitä jännityksiä. Päällysteen kylmimmissä käyttölämpötiloissa bitumi on jo huomattavan jäykkää ja elastista,

jolloin bitumiin syntyvät jännitykset ovat suurempia ja jännitysten relaksoituminen on hitaampaa. Tällöin päällysteeseen saattaa jäädä jännitystiloja, jotka yksinään tai yhdistettynä liikenteestä aiheutuvista jännityksistä saattavat johtaa päällysteen lujuuden ylitymiseen, jolloin päällyste halkeaa. (Bahia 2009, Shell Bitumen 1990).

Relaksaatiomoduuli voidaan määrittää vastaavasti myös leikkaussuunnassa, jolloin relaksaatiomoduuli on muotoa:

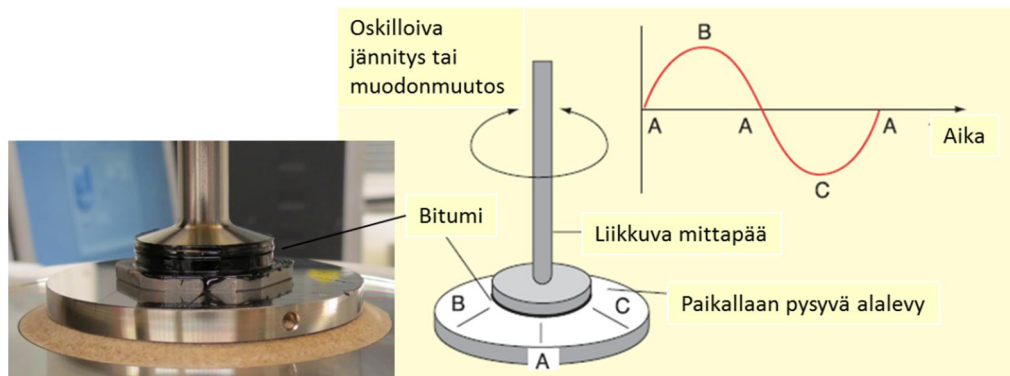
$$G(t) = \frac{\tau(t)}{\gamma_0}, \quad (6)$$

jossa $G(t)$ = relaksaatiomoduuli leikkaussuunnassa [Pa]
 $\tau(t)$ = muodonmuutoksen aiheuttama leikkausjännitys, joka pienenee [Pa]
 γ_0 = materiaaliin aiheutettu leikkausmuodonmuutos [-].

Leikkaus- sekä veto-puristus-suuntaisten relaksaatiomoduulien välillä on modifioimattomille bitumeille jälleen sama kaavojen 1, 2 ja 4 yhteys eli $E_R(t) = 3G(t)$. (Macosko 1994).

2.2.3 Dynaamis-mekaaninen analyysi (DMA)

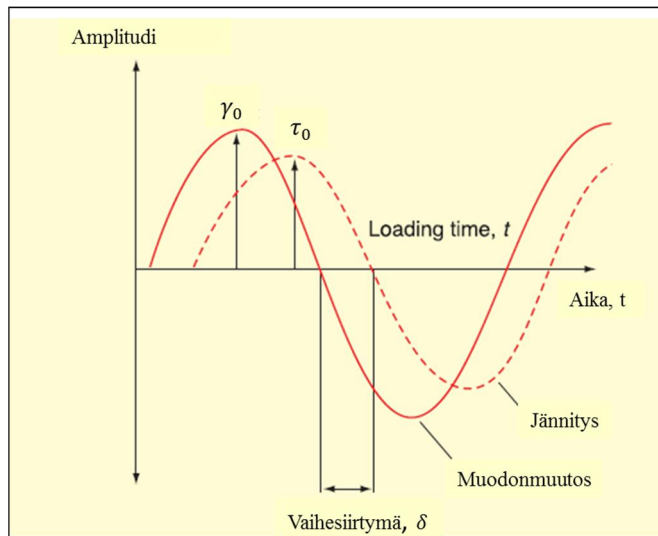
Dynaamis-mekaanisella analyysillä tutkitaan materiaalien reologisia ja viskoelastisia ominaisuuksia kuormittamalla materiaalia jaksollisella sinimuotoisella värähtelyliikkeellä. DMA:lla on mahdollista tutkia laajasti bitumin viskoelastisia ominaisuuksia sekä lämpötilan että kuormitusajan suhteen. Dynaamis-mekaaninen analyysi voidaan tehdä esimerkiksi dynaamisen leikkausreometrin (Dynamic Shear Rheometer = DSR) avulla. (Shell Bitumen 2003, Merzger 2014).



Kuva 5. Kaavioesitys leikkausreometrillä mittauksesta. (Muokattu lähteestä Shell 2003)

Reometrissa bitumi asetetaan tyypillisesti kuvan 5 mukaisesti kahden levyn väliin ja ylempää levyä liikuttamalla bitumiin aiheutetaan oskilloiva sinimuotoinen muodonmuutos leikkaussuunnassa. Sinimuotoiselle leikkausmuodonmuutokselle asetetaan vakioamplitudi sekä taajuus, joilla oskilloiva liike tapahtuu. Jos muodonmuutokset pysyvät viskoelastisesti lineaarisella alueella (LVE) eli ovat amplitudiltaan tarpeeksi pieniä, aiheuttaa kuormituksessa syntynyt sinimuotoinen leikkausmuodonmuutos samanmuotoisen leikkausjännityksen, jolla on myös sama taajuus. Viskoelastisella materiaalilla muodonmuutoksen aikaansaama jännitys on kuitenkin jäljessä aiheuttavaan muodonmuutokseen nähden. Tämä muodonmuutoksen ja jännityksen välinen vaihesiirtymä on nähtävissä kuvassa 6. (Shell Bitumen 2003, Merzger 2014). Seuraavaksi esitetään lyhyt kuvaus, miten dynaamis-mekaanisella analyysillä (Airey 1997, Ferry 1980, Macosko

1994, Merzger 2014) saadaan laskettua parametrit, joilla bitumin viskoelastisia ominaisuuksia usein kuvataan.



Kuva 6. Materiaalin muodonmuutoksen ja jännityksen välinen vaihesiirtymä, jossa muodonmuutoksen aiheuttama jännitys syntyy viipeellä. (Muokattu lähteestä Shell 2003)

Leikkausmuodonmuutoksen ja -jännityksen sinimuotoista vaihtelua voidaan kuvata ajan funktiona kaavoilla:

$$\gamma = \gamma_0 \sin(\omega t) \quad (7)$$

$$\tau = \tau_0 \sin(\omega t + \delta), \quad (8)$$

missä

- γ = leikkausmuodonmuutos [-]
- γ_0 = leikkausmuodonmuutoksen amplitudi [-]
- τ = leikkausjännitys [Pa]
- τ_0 = leikkausjännityksen amplitudi [Pa]
- ω = kulmataajuus [rad/s]
- t = aika [s]
- δ = vaihesiirtymä [rad].

Kulmataajuus ω määritetään taajuuden avulla kaavalla $\omega = 2\pi f$, jossa f on taajuus [Hz].

Leikkaussuunnassa tapahtuvasta sinimuotoisesta värähtelyliikkeestä lasketut parametrit, kuten moduuli tai viskositeetti, esitetään aina kompleksisessa muodossa (tähden * kanssa), jotta ne voidaan erottaa muulla tavalla lasketusta arvoista. Esimerkiksi mitattaessa leikkausmoduulia G kuormitetaan materiaalia joko vakiojännityksellä (viruma) tai -muodonmuutoksella (relaksaatio) pitkän ajan kuluessa, jonka perusteella materiaaliin kohdistuvia vaikutuksia mitataan pistepari kerrallaan, joista moduuliarvo lasketaan. (Merzger 2014).

Sinimuotoisesti ajan suhteen muuttuva leikkausmuodonmuutos ja -jännitys voidaan esittää myös kompleksimatematiikan avulla käyttäen merkintätapaa:

$$\gamma^* = \gamma_0 e^{i\omega t} \quad (9)$$

$$\tau^* = \tau_0 e^{i(\omega t + \delta)}, \quad (10)$$

missä $i = \sqrt{-1}$.

Nyt kompleksinen leikkausmoduuli G^* voidaan määrittää muodonmuutoksen aiheuttaman kompleksisen jännityksen sekä kompleksisen muodonmuutoksen osamääränä:

$$G^* = \frac{\tau^*}{\gamma^*} = \frac{\tau_0}{\gamma_0} e^{i\delta}, \quad (11)$$

jossa G^* = kompleksinen leikkausmoduuli tai lyhyesti kompleksimoduuli [Pa].

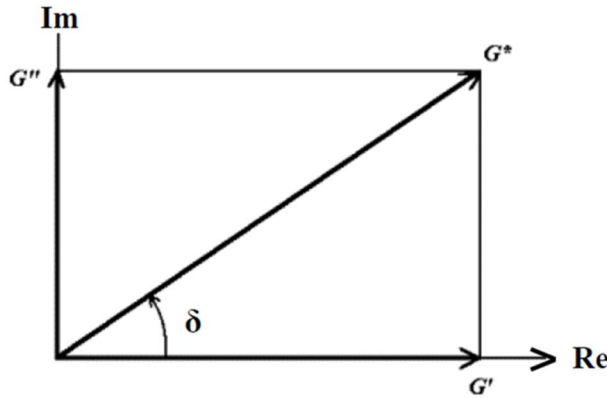
Kompleksimoduuli siis kuvaa, kuinka paljon materiaali vastustaa muodonmuutosta kuormitustilanteessa. Hyötynä moduuliarvon esittämisenä kompleksisessa muodossa on, että kompleksimoduulin arvo on riippumaton ajasta, toisin kuin suhde $\frac{\tau}{\gamma}$ (Ferry 1980). Toisaalta kompleksimoduuli voidaan jakaa Eulerin lauseen (Spiegel ym. 1999) avulla vielä reaali- ja imaginaariosaan:

$$G^* = \left(\frac{\tau_0}{\gamma_0}\right) \cos \delta + i \left(\frac{\tau_0}{\gamma_0}\right) \sin \delta = G' + iG'', \quad (12)$$

jossa G' = varastomoduuli [Pa]
 G'' = häviömoduuli [Pa].

Kompleksimoduulin vaiheessa olevaa reaalista komponenttia kutsutaan varastomoduuliksi. Se on määritelty muodonmuutoksen kanssa samassa vaiheessa olevan jännityksen ja muodonmuutoksen osamääränä. Varastomoduuli kuvaa bitumin kykyä varastoida muodonmuutosenergiaa jaksollisessa muodonmuutoksessa eli sen kimmoista käyttäytymistä. Häviömoduuli taas on kompleksimoduulin eri vaiheessa oleva imaginaarinen komponentti. Se on määritelty 90° eri vaiheessa muodonmuutoksen kanssa olevan jännityksen ja muodonmuutoksen osamääränä. Häviömoduuli kuvaa jaksollisessa muodonmuutoksessa menetettävää dissipoituvaa energiaa eli bitumin viskoosista käyttäytymistä, jossa pysyvään muodonmuutokseen eri virtaukseen käytetty mekaaninen energia muuntuu virtauskitkan vaikutuksesta lämmöksi. Kompleksimoduuli esitetään yleensä vektorina kompleksitasossa (kuva 7), jossa reaaliakseli kuvaa materiaalin elastista käyttäytymistä ja imaginaariakseli materiaalin viskoosia käyttäytymistä.

Oskilloivissa mittauksissa materiaaliominaisuuksista ei voida erotella viivästyneen elastisuuden vaikutusta (kts. 2.2.2), joka voi viskoelastisilla materiaaleilla on merkittäväkin. Viskoelastisen materiaalin viivästynyt elastinen kuormitusvaikutus on täysin palautuvaa eli kimmoista, mutta se riippuu ajasta, eikä oskilloiva sinimuotoinen värähtelyliike paljasta tällaista materiaalikäyttäytymistä. Varastomoduuli koostuu siis välittömän elastisen vaikutuksen lisäksi osasta viivästynyttä elastisuutta ja vastaavasti häviömoduuli koostuu puhtaasti viskoosin vaikutuksen lisäksi osasta viivästynyttä elastisuutta. (Airey 1997, Delgadillo ym. 2006).



Kuva 7. Kompleksimoduulin vektoriesitys kompleksitasossa: varastomoduuli (G') eli reaalinen osa x-akselilla, häviömoduuli (G'') eli imaginäärinen osa y-akselilla sekä vaihekulma δ .

Kompleksimoduulin suuruus esitetään yleensä itseisarvon muodossa, joka voidaan laskea joko muodonmuutoksen ja jännityksen amplitudien avulla tai kompleksitasosta vektorin pituutena:

$$|G^*| = \frac{\tau_0}{\gamma_0} = \sqrt{[(G')^2 + (G'')^2]}. \quad (13)$$

Kuvan 7 kompleksitasossa kompleksimoduulin ja reaaliakselin välin jäävää kulmaa kutsutaan vaihekulmaksi δ ja se on täysin analoginen aiemmin kuvassa 6 määritellyn vaihesiirtymän kanssa. Vaihekulma määritellään siis muodonmuutoksen ja muodonmuutoksen aikaansaaman jännityksen vaihe-erona ja se esitetään sinimuotoisen kuormituksen takia asteina tai radiaaneina. Vaihekulmalla voidaan kuvata materiaalin viskoelastista suhdetta, eli missä suhteessa materiaalikäyttäytyminen on kimmoista ja palautuvaa tai viskoosia eli palautumatonta. Täysin elastisella materiaalilla vaihekulma on nolla ja muodonmuutoksen aiheuttama jännitys on välitön. Tällöin kompleksimoduuli koostuu ainoastaan varastomoduulista. Vastaavasti puhtaasti viskoosilla materiaalilla vaihekulma on 90° , jolloin kompleksimoduuli koostuu täysin häviömoduulista. Koska bitumi on viskoelastinen materiaali, sen vaihekulmat vaihtelevat tällä välillä (0° - 90°) bitumin tyyppin, laadun, lämpötilan sekä taajuuden mukaan. Kylmissä lämpötiloissa ja suurilla taajuuksilla vaihekulma on pieni ja päinvastoin.

Samanlaista viskoelastista suhdetta voidaan kuvata myös häviökertoimen avulla, joka on määritelty viskoosin komponentin eli häviömoduulin sekä elastisen komponentin eli varastomoduulin suhteena:

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'}, \quad (14)$$

jossa $\tan \delta$ = häviökerroin [-].

Korkeissa lämpötiloissa, joissa bitumi alkaa käyttäytyä newtonilaisen nesteen tavoin, on bitumin ominaisuuksien esittäminen havainnollisempaa viskositeetin avulla. Dynaamisella testauksella saatavia mittaustuloksia voidaan esittää myös kompleksisen viskositeetin avulla leikkausjännityksen ja leikkausnopeuden tai suoraan kompleksimoduulin avulla:

$$\eta^* = \frac{\tau(t)}{\dot{\gamma}(t)} = \frac{\tau_0 \sin(\omega t + \delta)}{\omega \gamma_0 \sin(\omega t)} = \frac{G^*}{\omega}, \quad (15)$$

jossa η^* = kompleksinen viskositeetti [Pa s]

$$\dot{\gamma}(t) = \text{leikkausnopeus [s}^{-1}\text{]}.$$

Kompleksisen viskositeetin arvot on todettu olevan vertailukelpoisia perinteisesti mitattujen viskositeettiarvojen kanssa (Cox ja Merz 1958). Myös kompleksinen viskositeetti voidaan jakaa reaali- ja imaginaariosaan:

$$\eta^* = \eta' - i\eta''.$$
 (16)

Kompleksisen viskositeetin reaali-osa (η'), jota kutsutaan myös dynaamiseksi viskositeetiksi, kuvaa viskoelastisen materiaalin viskoosia osaa ja vastaavasti imaginaariosa (η'') elastista.

$$\eta' = \frac{G''}{\omega}$$
 (17)

$$\eta'' = \frac{G'}{\omega}$$
 (18)

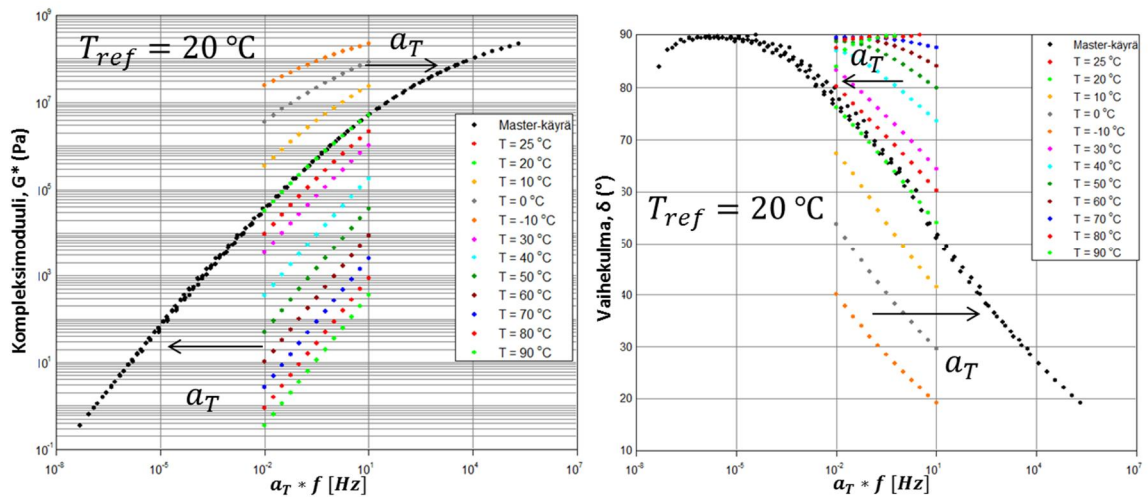
Dynaaminen materiaalin testaus on yksi parhaista tavoista tutkia bitumisen materiaalin monimutkaista käyttäytymistä. Mittauksissa saatavilla parametreilla G^* ja δ tai vastaavasti parametreilla G' ja G'' voidaan kuvata kattavasti bitumin viskoelastista käyttäytymistä sekä ajan että lämpötilan suhteen. Mittauksen lämpötilaa voidaan säätää tarkasti ja oskilloivan liikkeen takia sillä voidaan mitata muita menetelmiä paremmin erittäin lyhyidenkin kuormitusaikojen vaikutuksia. Dynaaminen mittaustulos voidaan muuttaa aika-lämpötila-superpositioperiaatteen avulla kuvaamaan myös pitkiä kuormitusaikoja. (Airey 1997, Bahia 2009).

Esitettäessä bitumin viskoelastista käyttäytymistä viruman tai relaksaation avulla, mitataan käyttäytymistä aina ajan suhteen. Dynaamisella mittauksella viskoelastinen käyttäytyminen taas mitataan taajuuden suhteen, koska mittaus tehdään oskilloivalla sinimuotoisella liikkeellä. Eri tavoilla määritellyt materiaalin käyttäytymistä kuvaavat viskoelastiset funktiot voidaan matemaattisilla muunnoksilla yhdistää toisiinsa, jos materiaalikäyttäytyminen pysyy lineaarisesti viskoelastisella alueella. Esimerkiksi dynaamisessa mittauksessa lasketut varasto- ($G'(\omega)$) ja häviömoduuli ($G''(\omega)$) voidaan muuntaa relaksaatiomoduliksi ($G(t)$), mikä käsitellään tarkemmin myöhemmin. Eksaktit suhteet ovat matemaattisesti monimutkaisia, mutta niiden rinnalle on kehitetty myös useita yksinkertaisempia ja käyttökelpoisempia approksimaatioita, joiden tarkkuus on useimpiin käyttötarkoituksiin riittävä. (Ferry 1980, Airey 1997, Macosko 1994, Berker 1998).

2.2.4 Aika-lämpötila-superpositioperiaate

Viskoelastisesti lineaarisella alueella olevien materiaalien (LVE-alue), kuten normaaleissa käyttöolosuhteissa bitumi, viskoelastisia ominaisuuksia kuvaavat parametrit riippuvat sekä lämpötilasta että kuormitusaajasta (tai dynaamisissa kuormitustilanteissa lämpötilasta sekä kuormitustaajuudesta). Termoreologisesti yksinkertaisilla materiaaleilla näiden kahden olosuhteen eli parametrin välillä on vastaavuussuhde, jota kutsutaan aika-lämpötila-superpositioperiaateksi (TTSP = time-temperature-superposition principle) (Airey 1997, Mangiafico 2014, Ferry 1980). Periaatteen mukaan lämpötilan muutoksen vaikutus materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin voidaan saavuttaa myös muuttamalla kuormitusaikaa tai kuormitustaajuutta. Esimerkiksi tietyssä lämpötilassa erittäin pitkällä kuormitusaajalla mitatut reologiset materiaaliominaisuudet voidaan saavuttaa myös lyhyemmällä kuormitusaajalla nostamalla mittaustilaa.

Superpositioperiaatetta voidaan hyödyntää materiaalin reologisten ominaisuuksien kuvaamisessa dynaamisten mittaustulosten, kuten taajuuspyyhkäisyyn avulla. Taajuuspyyhkäisyssä bitumin ominaisuuksia mitataan tietyssä lämpötilassa useilla eri taajuuksilla (Merzger 2014). Eri lämpötiloissa suoritettujen taajuuspyyhkäisymittausten voidaan yhdistää niin kutsutun siirtokertoimen (a_T) avulla yhdeksi jatkuvaksi käyräksi, jota kutsutaan Master-käyräksi (kuva 8). Siirtokerroin siirtää eri lämpötiloissa tehdyt taajuuspyyhkäisymittaukset vaakasuuntaisella siirrolla tietyn vapaasti valittavan referenssilämpötilan kanssa yhteismitalliseksi ja mittaukset voidaan esittää samalla jatkuvalla käyrällä. Master-käyrä esittää mittaustulokset taajuuden funktiona referenssilämpötilassa ja on ominainen kullekin materiaalille tässä lämpötilassa. Referenssilämpötilaa korkeammat lämpötilat tuottavat tietoa mitattua taajuusalueelta alemmista taajuuksista ja vastaavasti alemmat lämpötilat korkeammista taajuuksista. Näin rakennetun Master-käyrän avulla voidaan saada tietoa materiaalin käyttäytymisestä tietyssä lämpötilassa erittäin lyhyillä ja pitkällä kuormitusajalla, mikä ei normaaleilla mittaamenetelmillä olisi käytännössä mahdollista.



Kuva 8. Esimerkki bitumin Master-käyristä kompleksimoduulille (G^*) ja vaihekulmalle (δ). Värilliset käyrät ovat eri lämpötiloissa tehtyjen taajuuspyyhkäisyjen mittauspisteitä.

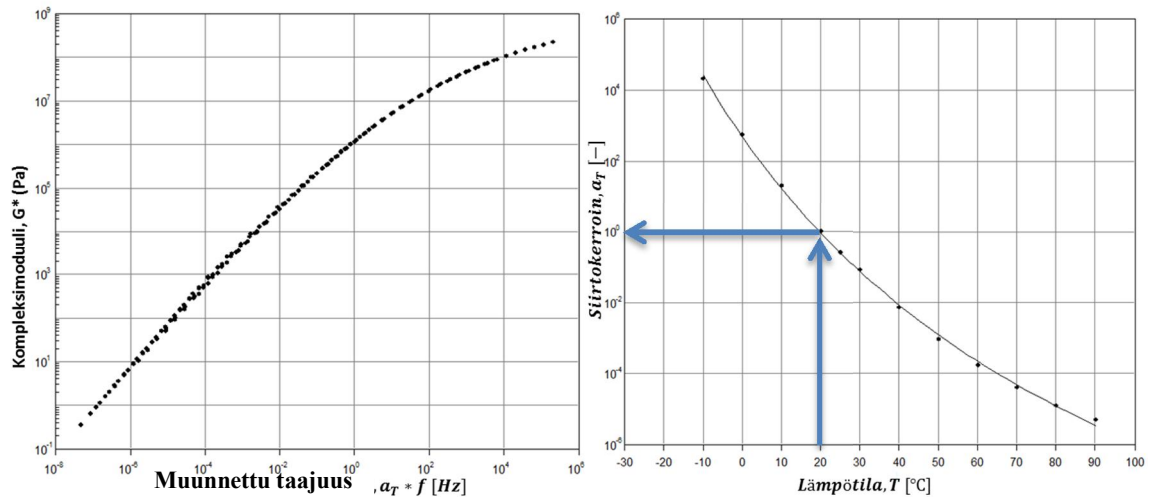
Dynaamisessa kuormitustilanteessa aika-lämpötila-superpositioperiaate määritellään taajuuden suhteen kaavalla 19:

$$G(f, T) = G(f a_T(T), T_{ref}), \quad (19)$$

jossa G = moduuli, joka voi olla G' , G'' tai $|G^*|$ [Pa]
 $a_T(T)$ = siirtokertoimen arvo halutussa lämpötilassa [-]
 f = kuormitustaajuus, jossa arvo halutaan tietää [Hz]
 T = lämpötila, jossa arvo halutaan tietää [°C]
 T_{ref} = Master-käyrän referenssilämpötila [°C].

Master-käyrän siirto yhdeksi jatkuvaksi kuvaajaksi voidaan tehdä myös muille reologisille parametreille kuten vaihekulmalle (kuva 8) tai häviökertoimelle. Jos superpositioperiaate toimii, yhdelle parametrille tehty siirto Master-käyräksi tuottaa jatkuvat kuvaajat samalla myös muille parametreille. Aika-lämpötila-superpositioperiaatetta voidaan hyödyntää myös virumasta tai relaksaatiosta mitattaviin tuloksiin. Samalla tavalla eri lämpötiloissa tehtyjä mittauksia voidaan siirtokertoimen avulla yhdistää yhdeksi Master-käyräksi, joka kuvaa materiaalikäyttäytymistä ajan suhteen.

Master-käyrän teossa referenssilämpötilasta poikkeavat lämpötilat yhdistetään samalle jatkuvalle Master-käyrälle siirtokerroimen avulla, joka on lämpötilan funktio. Vaa-
kasuuntaisen siirron määrä riippuu siis vain lämpötilasta ja siirtokerroin esitetään yleensä kuvaajana lämpötilan funktiona yhdessä Master-käyrän kanssa, kuten kuvassa 9 on esitetty. Siirtokerroimen suuruus kertoo, miten materiaalin viskositeetti muuttuu suhteessa referenssilämpötilan viskositeettiin ja kuvaaja näyttää myös miten viskoelastisen materiaalin ominaisuudet muuttuvat lämpötilan suhteen.



Kuva 9. Esimerkki bitumin kompleksimoduulin Master-käyrästä sekä siihen käytetystä aritmeettisesta siirtokerroinkäyrästä, jossa on esitetty siirtokerroimen riippuvuus referenssilämpötilasta: referenssilämpötilaksi on valittu 20 °C, jossa siirtokerroin a_T saa arvon 1.

Siirtokerroimen riippuvuus lämpötilasta voidaan määritellä usealla eri tavalla erilaisten matemaattisten mallien mukaan. Yksi yleisesti käytetty malli bitumilla on Williamsin, Landelin ja Ferryn (Williams ym. 1955) kehittämä logaritminen WLF-yhtälö, joka kuvaa siirtokerroimen riippuvuutta lämpötilasta ja se on muotoa:

$$\log a_T(T) = \log \frac{\eta_0(T)}{\eta_0(T_{ref})} = - \frac{C_1(T-T_{ref})}{C_2 + (T-T_{ref})}, \quad (20)$$

jossa

- $\log a_T(T)$ = siirtokerroin halutussa lämpötilassa T
- $\log a_T(T_{ref}) = 0$
- $\eta_0(T)$ = viskositeetti halutussa lämpötilassa T
- $\eta_0(T_{ref})$ = viskositeetti referenssilämpötilassa T_{ref}
- C_1, C_2 = empiirisesti määritetyt kertoimet

Aika-lämpötila-superpositioperiaatetta hyväksikäyttäen bitumin viskoelastiset ominaisuudet voidaan esittää kahden kuvaajan avulla. Siirtokerroin ilmentää bitumin viskositeetin muutoksia lämpötilan suhteen ja Master-käyrä kuvaa moduuliarvojen muutosta taajuuden funktiona tietyssä lämpötilassa.

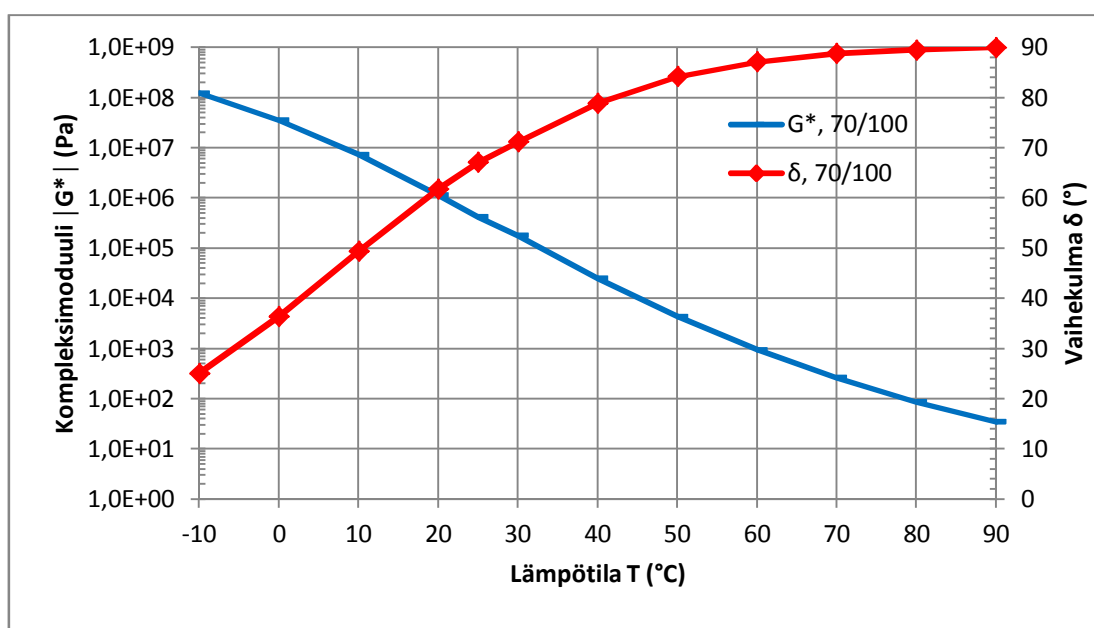
Aika-lämpötila-superpositioperiaatetta voidaan hyödyntää materiaaleille, jotka muuttuvat lämpötilan ja kuormitusajan vaikutuksesta kiinteistä puolikiinteiksi ja viimein nesteiksi, muuttamatta materiaalin rakennetta. Tätä amorfiselle aineelle ominaista olomuodon muutosta kutsutaan lasitransitioksi (Pfeiffer ja Saal 1940). Modifioimatonta bitumia voidaan yleisesti kuvata termoreologisesti yksinkertaisena materiaalina, jolloin TTS-periaatetta voidaan hyödyntää. On kuitenkin havaittu, että TTS-periaate ei toimi kiteisil-

le bitumeille (vahapitoisuus korkea), polymeerimodifioituille bitumeille eikä bitumeille, joiden asfalteenien osuus on suuri (Airey 1997).

2.2.5 Bitumin reologisten ominaisuuksien graafinen esittäminen

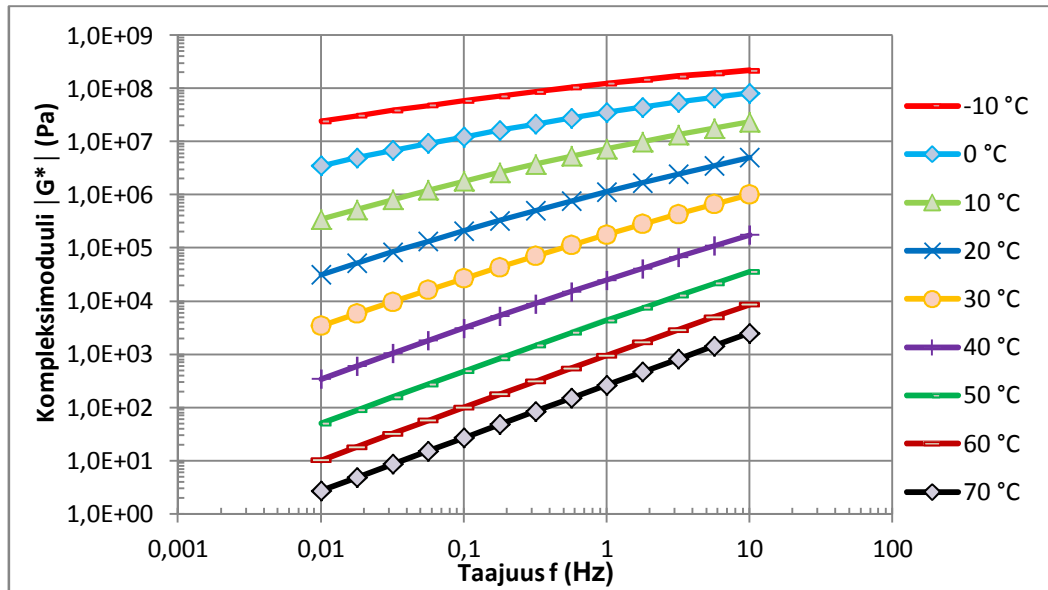
Bitumin reologiset ominaisuudet selvitetään yleensä reometrilla dynaamis-mekaanisella analyysillä. Saadut mittaustulokset on tärkeää pystyä esittämään muodossa, joka mahdollistaa bitumin reologisten ominaisuuksien kuvaamisen ja määrittämisen havainnollisesti.

Isokroninen käyrä kuvaa materiaalin käyttäytymistä vakiokuormitusajalla tai vakio-kuormitustaajuudella. Bitumin dynaamisessa testauksessa isokroniset käyrät kuvaavat kompleksimoduulin tai muiden viskoelastisten funktioiden käyttäytymistä lämpötilan suhteen tietyllä taajuudella (Airey 1997). Kuvassa 10 on esitetty esimerkki kompleksimoduulin ja vaihekulman isokronisista kuvaajista taajuudella 1 Hz.

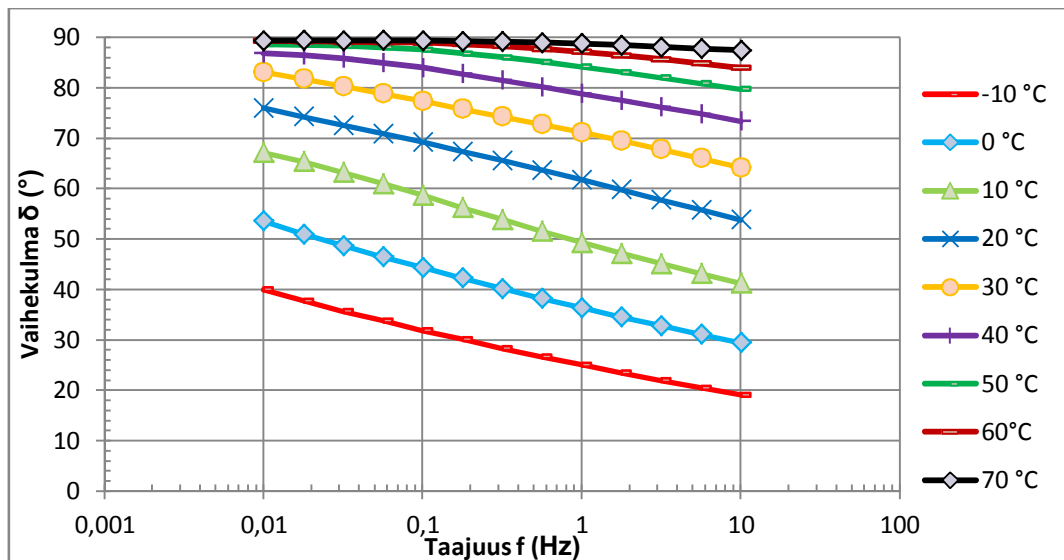


Kuva 10. Esimerkki 70/100-bitumin isokronisesta käyrästä taajuudella 1 Hz.

Isoterminen käyrä kuvaa materiaalin käyttäytymistä vakiolämpötilassa. Bitumin dynaamisessa testauksessa isotermitiset käyrät kuvaavat viskoelastisten funktioiden käyttäytymistä taajuuden suhteen tietyssä lämpötilassa (Airey 1997). Kuvissa 11 ja 12 on esitetty esimerkit kompleksimoduulin ja vaihekulman isoteremisistä kuvaajista eri lämpötiloissa.



Kuva 11. Esimerkki 70/100-bitumin isotermissistä käyristä eri lämpötiloissa kompleksimoduulille.

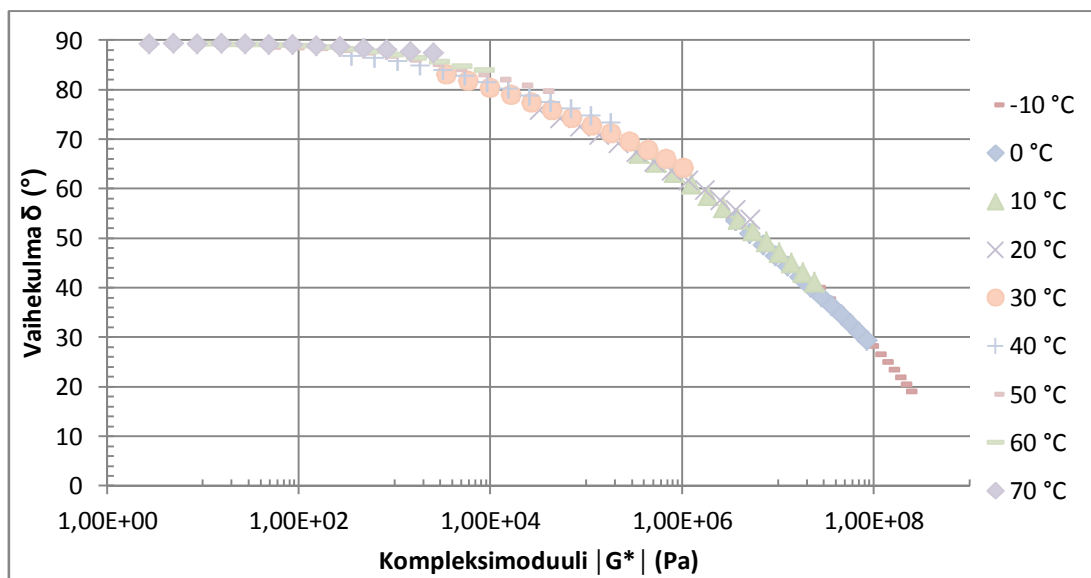


Kuva 12. Esimerkki 70/100-bitumin isotermissistä käyristä eri lämpötiloissa vaihekulmalle.

Kuten edellisessä luvussa jo mainittiin, Master-käyrän teossa yhdistetään isotermississä kuvaajissa olevat eri lämpötila-käyrät yhdeksi jatkuvaksi käyräksi siirtokertoimen avulla tietyn referenssilämpötilan suhteen (kuvat 8 ja 9). Silloin, kun eri isotermit eivät muodosta jatkuvaa Master-käyrää, bitumin rakenne muuttuu lämpötilan suhteen, jolloin aika-lämpötila-superpositioperiaate ei päde.

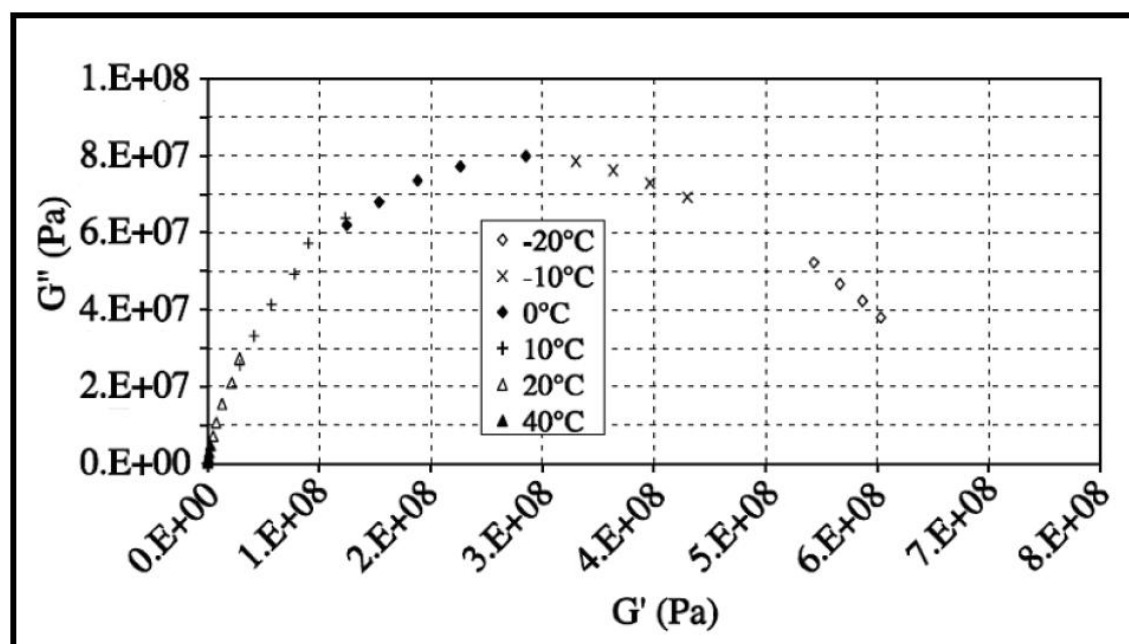
Black diagrammi kuvaa kompleksimoduulin ja vaihekulman riippuvuussuhdetta bitumin dynaamisissa testauksissa. Black diagrammi kuvaa bitumin käyttäytymistä ilman taajuus- tai lämpötilariippuvuutta, mikä mahdollistaa dynaamisten mittaustulosten esittämisen yhdessä kuvaajassa ilman TTS-periaatteen hyödyntämistä mittaustuloksiin. Black diagrammin avulla voidaan todentaa bitumin termoreologinen yksinkertaisuus. Jos Black diagrammi tuottaa jatkuvan yhtenäisen käyrän, TSS-periaate pätee. Käyrän katkonaisuus taas kertoo, ettei TTS-periaate toimi, mikä saattaa johtua bitumin korkeasta vahapitoisuudesta, asfaltenien suuresta osuudesta tai että bitumi on polymeerimodifioitua. Black diagrammi saattaa tuottaa epäjatkuvan käyrän myös, jos reologiset mittaukset on tehty LVE-alueen ulkopuolella tai reometrillä tehdyt mittaukset on suoritettu väärin-

laisella mittausgeometrialla. Kuvassa 13 on esimerkki tuoreen 70/100 bitumin Black diagrammista. Black diagrammit korostavat puolilogaritmisen kuvaajan takia tarkemmin korkeampia lämpötiloja sekä alhaisempia taajuuksia. Black diagrammi voidaan esittää myös niin, että vaihekulma on x-akselilla ja kompleksimoduuli y-akselilla. (Airey 2002, Mangiafico 2014)



Kuva 13. Esimerkki bitumin Black diagrammista, jossa eri lämpötiloissa mitatut pisteet on eroteltu eri väreillä.

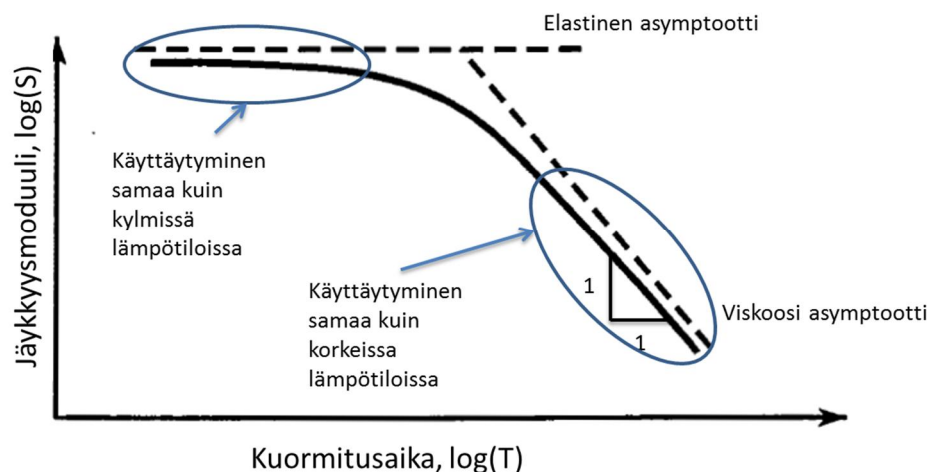
Cole-Cole -diagrammi kuvaa häviömoduulin ja varastomoduulin välistä riippuvuutta kompleksitasossa. Diagrammin avulla voidaan kuvata bitumin viskoelastista käyttäytymistä siten, että eri taajuuksilla ja lämpötilassa mitatut arvot asettuvat samalle jatkuvalle käyrälle. Kuvassa 14 on esimerkki Cole-Cole -diagrammista. Koska kuvaaja esitetään lineaarisessa skaalassa, korostuvat siinä matalat lämpötilat sekä suuret taajuudet, missä varastomoduuli on hallitseva eli bitumin elastiset ominaisuudet korostuvat. (Airey 1997 Mangiafico 2014).



Kuva 14. Esimerkki bitumin Cole-Cole diagrammista, jossa eri lämpötiloissa mitatut pisteet on eroteltu eri merkeillä. (Muokattu lähteestä Yusoff 2012)

2.2.6 Modifioimattoman bitumin reologisia ominaispiirteitä

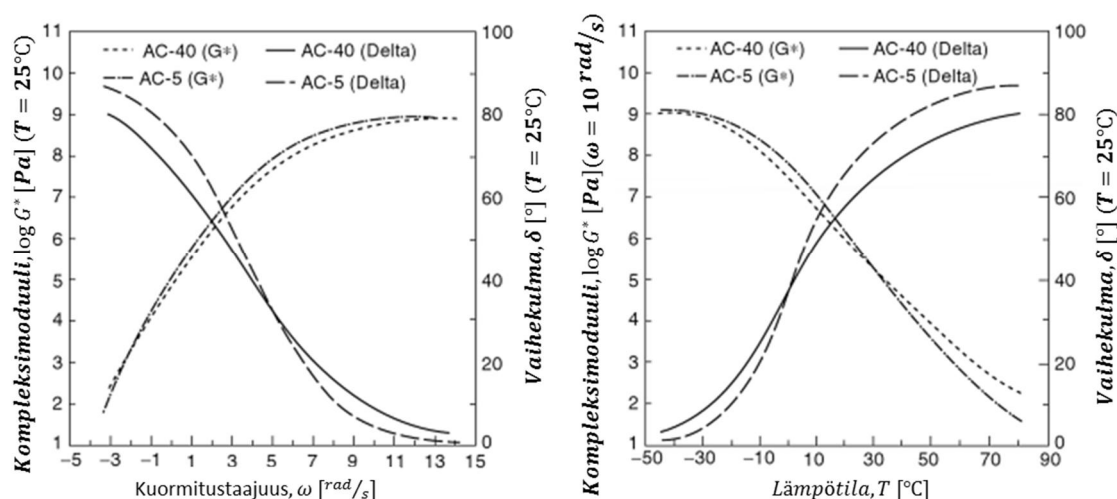
Erilaisista kuvaajista voidaan kaikille modifioimattomille bitumeille löytää muutamia bitumin reologisiin ominaisuuksiin liittyviä yhteisiä piirteitä, joita on esitetty kuvissa 15 ja 16. Erittäin alhaisissa lämpötiloissa tai lyhyillä kuormitusajoilla (tai korkeilla kuormitustaajuuksilla) bitumi saavuttaa maksimijäykkyytensä, joka leikkaussuunnassa on noin 1 GPa ja veto-puristussuunnassa noin 3 GPa. Tällöin bitumi käyttäytyy täysin kimmoisasti eli sen vaihekulma lähenee arvoa $\delta = 0^\circ$. On oletettu, että kaikilla bitumeilla on sama maksimijäykkyyden arvo. Tällä alueella bitumin ominaisuudet eivät juuri muutu lämpötilan tai kuormitusajan (tai taajuuden) vaikutuksesta. (Bahia 2009, Airey 1997).



Kuva 15. Bitumin jäykkyysmoduulin riippuvuus kuormitusajasta ja ominaisuuksien lähestyminen ääritilanteissa kohti elastista sekä viskoosia asymptoottia. (Muokattu lähteestä Airey 1997)

Kun bitumin lämpötila nousee tai sen kuormitusaika kasvaa (tai taajuus pienenee) ääriolosuhteista, bitumin jäykkyys ja elastiset ominaisuudet pienenevät. Tämä ilmenee moduularvojen merkittävänä laskuna sekä vaihekulman kasvuna. Tällä viskoelastisella alueella lämpötilan ja kuormitusajan (tai -taajuuden) vaikutukset ovat merkittävimmät. Se miten nopeasti muutokset viskoelastisissa parametreissa tapahtuvat, eli millainen muoto käyrällä on, riippuvat bitumin laadusta ja rakenteesta. (Bahia 2009, Airey 1997)

Korkeissa lämpötiloissa tai pitkällä kuormitusajalla (lyhyillä taajuuksilla) bitumin käyttäytyminen muuttuu täysin viskoosiksi nesteeksi, jolloin vaihekulma nousee arvoon $\delta = 90^\circ$ (Bahia 2009). Tällä alueella jäykkyyttä kuvaavat käyrät (joko kuormitusajan tai -taajuuden suhteen) yhtyvät viskoosista tilaa kuvaavaan asymptoottiin, jonka kulmakerroin log-log-kuvaajassa on 1/1 (kuva 15). Tällöin bitumi käyttäytyy siis newtonilaisen nesteen tavoin, eli liikuttaessa pienillä jännityksillä ja muodonmuutoksilla leikkausnopeus on verrannollinen leikkausjännitykseen, jolloin bitumin viskositeetti tietyssä lämpötilassa mitattuna on vakio. (Blomberg 1990, Shell Bitumen 1990, Airey 1997).



Kuva 16. Kahden modifioimattoman bitumin tyypilliset reologiset ominaisuudet (kompleksimoduuli ja vaihekulma) esitettyinä a) taajuuden sekä b) lämpötilan suhteen. (Muokattu lähteestä Bahia 2009)

Kun materiaalin viskoelastisia ominaisuuksia kuvataan esimerkiksi dynaamisessa kuormituksessa saatavilla parametreilla, on olennaista myös tiedostaa, mikä on materiaalin käyttötarkoitus ja millaisia ominaisuuksia siltä halutaan. Esimerkiksi bitumin ominaisuuksia on järkevää tarkastella sen perusteella, miten sen ominaisuudet vaikuttavat asfalttimassan ja valmiin asfalttipäällysteen ominaisuuksiin ja toimintakykyyn.

Kompleksimoduulilla (G^*) kuvataan bitumin jäykkyyttä eli kuinka paljon materiaali pystyy vastustamaan muodonmuutosta kuormitustilanteessa. Korkeissa lämpötiloissa tai pitkillä kuormitusajoilla (tai pienillä taajuuksilla) raskaan liikenteen aiheuttama deformaatiourautuminen on merkittävin päällystevauriotyyppi. Parempi kestävyys deformaatiourautumiselle saadaan suuremmilla kompleksimoduuliarvoilla, koska tällöin kyky vastustaa kuormituksesta johtuvaa muodonmuutosta (eli urautumista) on suurempi. Toisaalta taas kylmissä lämpötiloissa pakkashalkeilu on asfalttipäällysteen merkittävin vauriotyyppi. Tällöin taas pienemmät jäykkyydet ovat suotavampia, koska lämpökutistumisesta syntyvät jännitykset päällysteeseen eivät kasva niin suuriksi. (Bahia 2009).

Vaihekulmalla (δ) kuvataan taas bitumin elastisuutta eli missä suhteessa kuormitustilanteessa bitumin materiaalikäyttäytyminen on elastista ja viskoosia. Deformaatiourautumisessa suurempi elastisuus (pienempi vaihekulma) on parempi, koska tällöin kuormituksesta syntyvä muodonmuutoksen palautuva osuus on suurempi. Vastaavasti pakkashalkeilulle parempi kestävyys saadaan, kun bitumi on virtaavampaa (suuremmat vaihekulmat). Tällöin bitumi on viskoosimpaa eli juoksevampaa, jolloin bitumin kyky relaksoida siihen syntyviä jännityksiä on nopeampaa. (Bahia 2009).

2.3 Bitumisen sideaineen vanheneminen

2.3.1 Vanhenemisen syntytavat

Muiden orgaanisten aineiden tavoin myös bitumin ominaisuudet muuttuvat hapen, UV-säteilyn sekä lämpötilavaihteluiden takia ajan kuluessa. Nämä ulkoiset ympäristövaikutukset kovettavat bitumia, mikä ilmenee bitumin tunkeuman pienenemisenä sekä pehmenemispisteen ja viskositeetin kasvuna. (Shell Bitumen 1990). Bitumin kovettuminen

kasvattaa sen jäykkyyttä, mutta tekee siitä samalla hauraampaa, mikä altistaa koko päällysteen herkemmin vaurioille (Qin ym. 2014). Tällaista ilmiötä kutsutaan bitumin vanhenemiseksi. Jäykkyyden kasvun lisäksi bitumin vanheneminen muuttaa myös sen fysikaaliskemiallisia ominaisuuksia niin, että bitumisen sideaineen venymäominaisuudet ja tartuntakyky kärsivät (Karlsson ja Isacsson 2006). Merkittäviä bitumin vanhenemisestä johtuvia päällystevaurioita ovat liikenteen kuormituksesta tai lämpötilanvaihteluista aiheutuvat päällysteen halkeilu sekä purkautuminen (Lu ja Isacsson 2002).

Bitumin vanhenemisen pääsyitä ovat hapettuminen, bitumin kevyimpien komponenttien haihtuminen ja absorptio sekä fysikaalinen ja steerinen kovettuminen.

- Bitumin hapettumista pidetään merkittävimpana syynä bitumin vanhenemiseen. Bitumin hapettumisessa bitumi reagoi ilman hapen kanssa, jolloin sen kemiallinen koostumus muuttuu. Bitumissa olevien polaaristen yhdisteiden osuus kasvaa, mikä kasvattaa myös bitumissa olevien sidosten välistä voimakkuutta. Nämä kemialliset muutokset tekevät bitumista kovempaa ja vähemmän joustavaa. Koska hapettuminen muuttaa bitumin kemiallista koostumusta hapen reagoiessa bitumin komponenttien kanssa, on vanheneminen palautumatonta. Hapettumisen suuruuteen ja nopeuteen vaikuttavat merkittävästi lämpötila, ilman hapen kanssa kosketuksessa olevan bitumin määrä sekä kulunut aika. (Shell Bitumen 1990).
- Bitumin vanhenemista tapahtuu myös, kun bitumin kevyimmät öljymäiset komponentit haihtuvat ilmaan korkeammissa lämpötiloissa tai absorboituvat kiviaineksen pinnan huokosiin. Molemmissa tapauksissa bitumin koostumus ja rakenne muuttuvat molekyylipainoltaan raskaammiksi, jolloin bitumi kovettuu. Nämä vanhenemisen mekanismit eivät palaudu itsestään, mutta lisäämällä sopivaa öljyä voidaan bitumin ominaisuudet palauttaa. (Shell Bitumen 1990).
- Bitumin vanheneminen voi olla myös palautuvaa, jolloin puhutaan fysikaalisesta tai steerisestä kovettumisesta. Molemmissa tapauksissa bitumin sisäinen rakenne muuttuu, kun bitumin molekyylit alkavat hitaasti muuttaa suuntautumista. Fysikaalista kovettumista tapahtuu alhaisissa lämpötiloissa pitkän ajan kuluessa, kun bitumin vahamaiset yhdisteen alkavat kiteytyä. Steeristä kovettumista tapahtuu huoneenlämpötiloissa pitkän ajan kuluessa, kun bitumin molekyylipainoltaan raskaimmat komponentit alkavat muodostaa yhä vahvempia rakenteita. Molemmissa tapauksissa bitumin sisäisen rakenteen muutos kovettaa bitumia, mutta koska näissä tapauksissa vanheneminen on palautuvaa, voidaan bitumissa tapahtuneet muutokset palauttaa alkuperäisiksi lämmittämällä bitumia. (Masson ym. 2002)

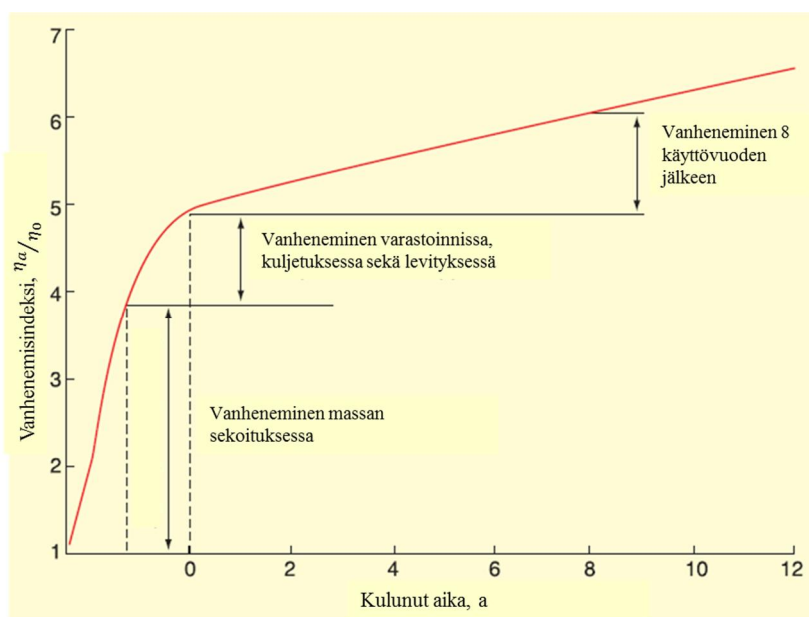
Bitumin vanhenemista tapahtuu kaikissa sideaineen elinkaaren vaiheissa. Bitumin vanheneminen jaetaan usein lyhytaikaiseen ja pitkäaikaiseen vanhenemiseen. Lyhytaikaisella vanhenemisella tarkoitetaan asfalttimassan valmistuksen, säilytyksen, kuljetuksen ja levityksen aikana tapahtuvaa bitumin vanhenemista ja pitkäaikaisella vanhenemisella valmiissa päällysteessä tapahtuvaa vanhenemista koko päällysteen elinkaaren aikana.

Merkittävä osa bitumin vanhenemisestä tapahtuu jo asfalttimassan valmistusvaiheessa. Asfalttimassan valmistusprosessissa bitumin ja kiviaineksen sekoituslämpötilat ovat korkeita, mikä altistaa sideaineen voimakkaampaan ja nopeampaan hapettumiseen. On arvioitu (Shell Bitumen 1990), että bitumin hapettumisnopeus kaksinkertaistuu jokaisen

kymmenen asteen lämpötilan noususta, kun lämpötila on yli 100 °C ja esimerkiksi Asfalttinormien mukaan SMA-massan sekoituslämpötilarajat tiebitumia 70/100 käytettäessä asfalttiasemalla ovat 160-200 °C. Asfalttimassan valmistuksessa bitumi on myös enemmän suoraan kosketuksessa ilman hapen kanssa bitumin levittyessä sekoituksessa ohueksi kalvoksi kiviainesrakeiden päälle, mikä vielä kiihdyttää hapettumista (Shell Bitumen 1990). Suurempi kosketuspinta-ala ilman kanssa näin korkeissa lämpötiloissa saattaa aiheuttaa myös bitumin kevyimpien komponenttien haihtumista (Karlsson ja Isacsson 2006). Tavallisesti bitumi kovenee asfalttimassan valmistuksessa noin yhden bitumiluokan verran, eli esimerkiksi bitumiluokasta 70/100 luokkaan 50/70 (Shell Bitumen 1990, Pank 2011). Bitumin vanhenemista tapahtuu myös asfalttimassan säilytyksessä, kuljetuksessa sekä levityksessä samoista syistä kuin massan valmistuksessa, mutta vähemmässä määrin (Shell Bitumen 1990).

Bitumin vanheneminen jatkuu myös valmiissa asfalttipäällysteessä koko sen elinkaaren aikana, jolloin puhutaan pitkäaikaisesta vanhenemisesta. Asfalttipäällysteessä tapahtuva bitumin vanheneminen voi vaihdella hyvinkin voimakkaasti. Merkittävin bitumin vanhenemiseen vaikuttava tekijä tieoloissa on päällysteen tyhjätila. Päällysteen suurempi tyhjätila mahdollistaa hapen pääsyn paremmin päällysteeseen, koska myös ilman kanssa suorassa kosketuksessa olevan bitumin määrä kasvaa ja bitumi kovenee hapetuessaan. Bitumin vanheneminen on kaikkein suurinta päällysteen pinnassa, koska pinta on jatkuvassa kosketuksessa ilman kanssa, päällysteen pintalämpötila on kuumalla säällä muuta päällystettä korkeampi sekä auringonvalon UV-säteily kovettaa päällysteen pinnassa olevaa bitumia. Pääosa bitumista on kuitenkin suojassa hapettumiselta. Päällysteen lämpötilan mukaan bitumissa tapahtuu ajan myötä myös steeristä sekä fysikaalista kovettumista. (Shell Bitumen 1990, Zaubanis ym. 2014a, Karlsson ja Isacsson 2006).

Kuvassa 17 on esitetty, miten bitumi vanhenee asfalttipäällysteen elinkaaren aikana. Bitumin vanheneminen esitetään usein niin kutsutun vanhenemisindeksin avulla, jossa verrataan kuinka paljon tutkittu ominaisuus kuten esimerkiksi viskositeetti tai jäykkyys on muuttunut suhteessa alkuperäiseen tai johonkin muuhun tilaan. Vanhenemisindeksi määritellään yleensä tapauskohtaisesti sen mukaan, mitä tietoa bitumin vanhenemisesta halutaan verrata. (Shell Bitumen 1990).



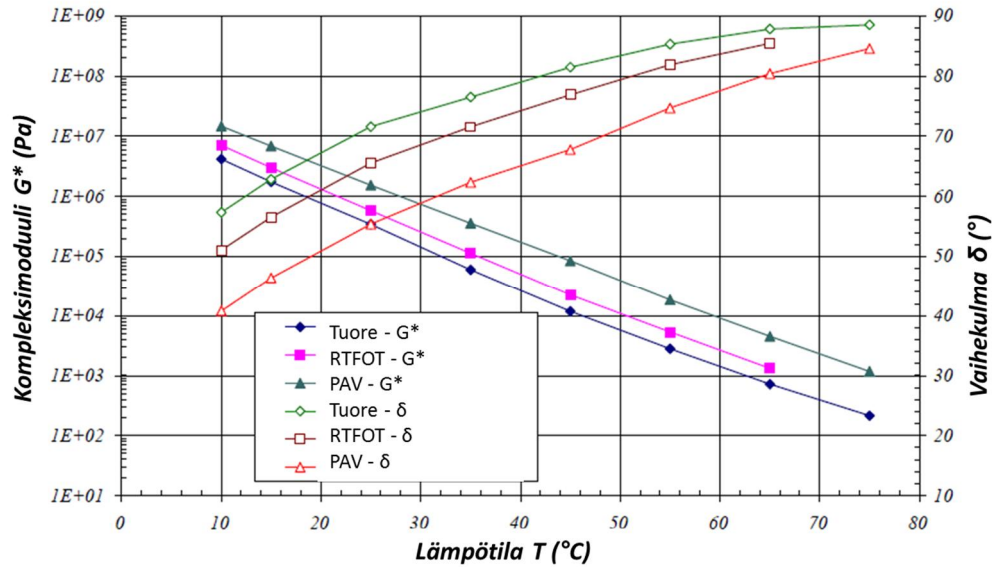
Kuva 17. Bitumin vanheneminen asfalttimassan ja päällysteen valmistuksessa sekä päällysteen käyttöänsä myötä. (Muokattu lähteestä Shell Bitumen 2005)

Bitumin vanhenemista tapahtuu myös asfalttipäällysteen kuumakierrätyksessä, kuten Rem-toimenpiteen yhteydessä. Asfalttipäällysteen paikanpäällä olevassa kuumakierrätyksessä asfalttimassaa lämmitetään, jyrsitään ja sekoitetaan uuden massan sekä elvyttimeen kanssa. Kaikissa näissä vaiheissa bitumi altistuu voimakkaammalle vanhenemiselle aivan kuten asfalttimassan lyhytaikaisessa vanhenemisessä. Tutkimuksen mukaan (Dunn 2001) on arvioitu, että paikanpäällä tapahtuvassa kuumakierrätyksessä bitumin tunkeuma-arvo voi laskea jopa 20 %, jos kierrätettävään asfalttimassaan ei lisätä lainkaan uutta massa tai elvytintä.

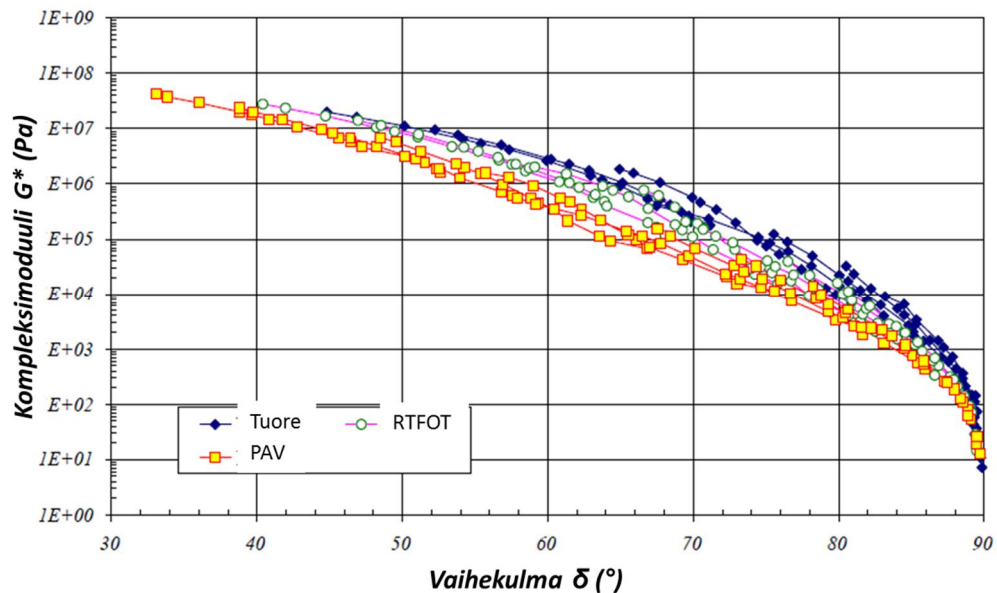
Asfalttimassassa ja -päällysteessä eri vaiheissa tapahtuvaa bitumin vanhenemista on pyritty jäljittelemään erilaisilla vanhentamiskäsittelyillä laboratorio-oloissa. Testien tarkoituksena on selvittää, millaiset vanhenemisominaisuudet eri bitumilaaduilla on ja mikä bitumilaatu sopisi parhaiten kullekin kohteelle. Bitumin lyhytaikaista vanhenemista testataan yleensä ohutkalvo- eli RTFOT-menetelmällä (Rolling Thin Film Oven Test), jossa ohut ja jatkuvassa liikkeessä oleva bitumikalvo altistetaan lämmölle (163 °C) sekä ilmalle 75 minuutin ajan. (Shell Bitumen 1990). Pitkäaikaisen vanhenemisen kuvaamiseen on kehitetty PAV-menetelmä (Pressure Aging Vessel), jossa bitumia vanhennetaan paineistetulla vanhennusastialla korkeassa paineessa ja lämpötilassa (Anderson ym. 1994).

2.3.2 Vanhenemisen vaikutukset reologiaan ja päällysteen kestävyysteen

Bitumin vanheneminen muuttaa bitumin kemiallista koostumusta, jolloin myös sen reologiset ja mekaaniset ominaisuudet muuttuvat (Qin ym. 2014). Bitumin vanhenemisen vaikutuksia sen reologisiin ominaisuuksiin voidaan tarkastella esimerkiksi isokronisen kuvaajan (kuva 18) tai Black diagrammin (kuva 19) avulla. Vanheneminen kasvattaa bitumin jäykkyyttä, mikä voidaan todeta kompleksimoduulin (G^*) arvojen kasvuna (kuva 18). Samalla myös varastomoduuli (G') ja häviömoduuli (G'') kasvavat tosin eivät samassa suhteessa. Vanheneminen kasvattaa myös bitumin elastisuutta, mikä näkyy vaihekulman (δ) pienentymisenä. Elastisuuden kasvu voidaan havaita hyvin black diagrammin avulla kuvasta 19. Vanheneminen aiheuttaa bitumin käyrän siirtymistä alhaisempiin vaihekulmiin verrattuna tuoreeseen bitumiin, eli vastaavalla jäykkyydellä vanhentunut bitumi on elastisempaa. (Airey 2002, Lu ja Isacsson 2002, Mastrofini ja Scarsella 2000, Laukkanen ym. 2013). Kuvien 18 ja 19 bitumit ovat laboratoriossa vanhennettuja bitumeja, ja on huomattu, että tiellä tapahtuva vanheneminen voi olla voimakkaampaa varsinkin päällysteen pinnassa (Qin ym. 2014). Vanhenemisen vaikutukset bitumin ominaisuuksiin eivät kuitenkaan ole systemaattisia, vaan vaihtelevat bitumin olosuhteiden mukaan. Esimerkiksi normaaleissa ja korkeammissa lämpötiloissa vanheneminen kasvattaa bitumin jäykkyyttä suhteessa enemmän verrattuna kylmiin lämpötiloihin (Mastrofini ja Scarsella 2000, Lu ja Isacsson 2002, Blomberg ym. 2016).

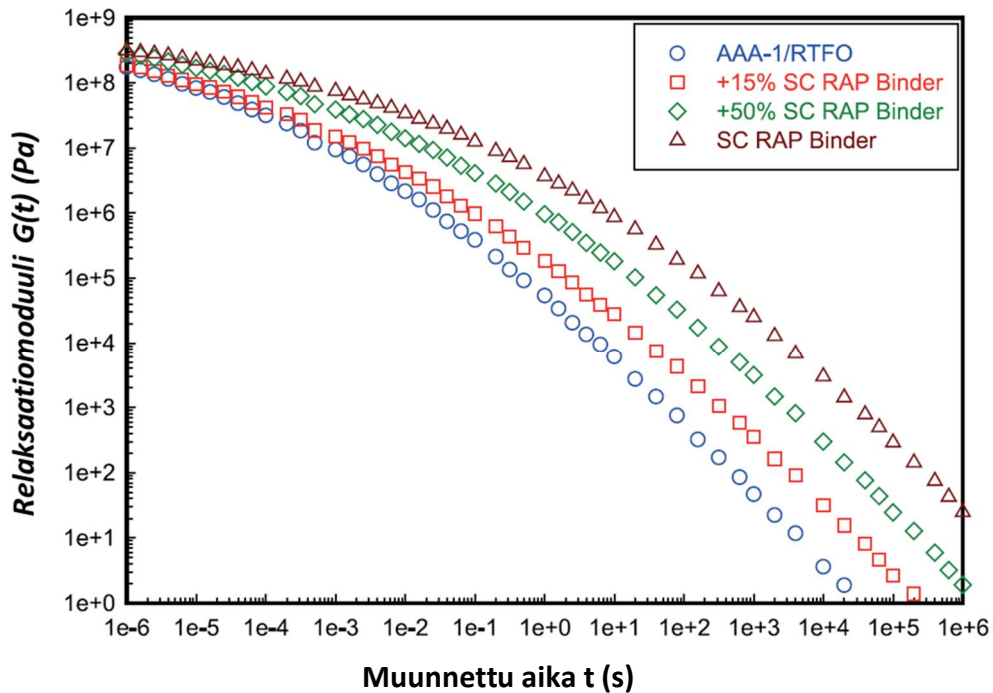


Kuva 18. Bitumin isokroniset käyrät kompleksimoduulille sekä vaihekulmalle taajudella 1 Hz. Kuvaajassa on esitetty tuore, RTFOT-vanhennettu sekä PAV-vanhennettu bituminäyte. (Muokattu lähteestä Airey 2002)



Kuva 19. Erään bitumin Black diagrammit tuoreelle, RTFOT-vanhennetulle sekä PAV-vanhennetulle bituminäytteelle. (Muokattu lähteestä Airey 2002)

Vanhenemisesta johtuvat muutokset reologiassa muuttavat myös bitumin ja samalla koko päällysteen kykyä relaksoida jännityksiä. Bitumin vanhentuessa sen kyky relaksoida jännityksiä heikkenee, koska bitumi muuttuu elastisemmaksi ja sen virtausominaisuudet heikkenevät. Tästä syystä bitumi ei pysty vapauttamaan niin nopeasti siihen syntyviä jännitystiloja eli sen relaksaatioaika pitenee. Tämä voidaan havaita kuvan 20 relaksaatiomoduulikäyrän leventymisenä. (Huang ym. 2014, Ruan ym. 2003, Soenen ym. 2003)



Kuva 20. Relaksaatiomoduulikäyrät RTFOT-vanhennetulle bitumille sekä vanhentunutta RAP-sideainetta sisältäville sideaineille. (Muokattu lähteestä Huang ym. 2014)

Bitumin vanheneminen voi aiheuttaa asfalttipäällysteen halkeilua sekä purkautumista. Vaikka liikenteen kuormituksesta aiheutuvat jännitystilat saattavat edesauttaa päällysteen vaurioiden syntyä, vanhenemisesta johtuvat muutokset bitumin reologiassa voivat olla niin merkittäviä, että päällyste voi halkeilla jo pelkästään lämpötilamuutoksessa syntyvien jännityksien takia. (King ym. 2012).

Bitumin vanheneminen aiheuttaa materiaalin haurastumista, mikä altistaa herkemmin päällysteen lohkoalkeilulle (block cracking) sekä pinnan purkautumiselle (ravelling). Tällaisten vanhenemisesta johtuvien päällystevaurioiden syntymekanismeja ei vielä täysin ymmärretä. Ruan ym. (2003b) tutkivat kirjallisuusselvityksessä, että useiden kenttätutkimusten mukaan bitumin venymäominaisuudet korreloivat alhaisissa lämpötiloissa melko hyvin tällaisten päällystevaurioiden kanssa. Vanheneminen alentaa bitumin venymäominaisuuksia huomattavasti ja niiden pienentyessä tarpeeksi, on halkeilu väistämätöntä. Halkeilun arvioidaan alkavan, kun venymätestin tulos laskee alle 5 cm ja halkeilun olevan huomattavaa, kun tulos laskee alle 3 cm (testi lämpötilassa 15 °C ja venytysnopeudella 1 cm/min). Venymäominaisuuksien pieneminen johtuu bitumin viskositeetin ja varastomoduulin kasvusta, ja muutoksia venymäominaisuuksissa voidaan tutkia ja ymmärtää myös näiden reologisten ominaisuuksien avulla. (Ruan ym. 2003).

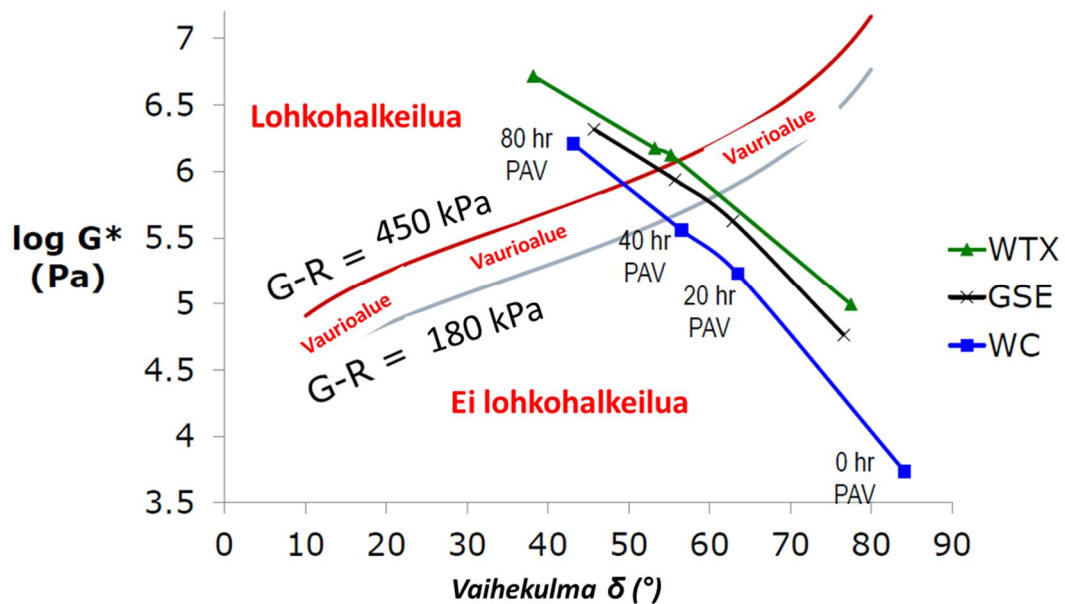
Venymäominaisuuksien tutkimiseen reologisten ominaisuuksien avulla on johdettu (Glover ym. 2005, Ruan ym. 2003) $G'/(\eta'/G')$ -parametri, joka korreloi hyvin bitumin venymätestin (suoritettuna lämpötilassa 15 °C ja venytysnopeudella 1 cm/min) tulosten kanssa varsinkin, jos venymät näissä oloissa ovat alle 10 cm. $G'/(\eta'/G')$ -parametri, jossa G' on bitumin varastomoduuli ja η' bitumin dynaaminen viskositeetti, mitataan lämpötilassa 15 °C sekä kulmataajuudella 0,005 rad/s, joiden on arvioitu vastaavan venymätestin olosuhteita. $G'/(\eta'/G')$ -parametrille voidaan johtaa myös muoto:

$$\frac{G'}{\eta'/G'} = \frac{G^*(\cos \delta)^2}{\sin \delta} * \omega, \quad (21)$$

jota kutsutaan G-R-parametriksi (Glover-Rowe). Parametrin esitystavan muutoksen hyötynä on, että tuloksia voidaan esittää Black diagrammissa kompleksimoduulin ja vaihekulman avulla, jos mittaustaajuus ja lämpötila tunnetaan. Jos vanhenemisesta johtuvan vaurioitumisen syntyperusteena käytetään venymätestin arvoja 5 ja 3 cm, voidaan venymätestitulosten ja parametrin välisen korrelaation kautta laskea G-R-parametrille vauriorajat, jotka voidaan esittää käyrinä (mittaustaajuus 0,005 rad/s) Black diagrammissa. G-R-parametrin raja-arvoiksi on laskettu:

$$\begin{aligned} \text{Jäykkyys, jossa vauriokynnys ylittyy (venymä 5 cm): } & \frac{G * (\cos \delta)^2}{\sin \delta} = 180 \text{ kPa} \\ \text{Jäykkyys, jossa halkeilu todennäköistä (venymä 3 cm): } & \frac{G * (\cos \delta)^2}{\sin \delta} = 450 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Kuvassa 21 on esitetty, miten vauriorajat muodostavat Black diagrammiin käyrät. Kuvassa näkyy myös, miten vanheneminen siirtää bitumin ominaisuuksia jäykemmiksi sekä elastisemmiksi ja samalla kohti vaurioaluetta. Kuvassa on kolme eri bituminäytettä, joita on vanhennettu PAV-menetelmällä 20, 40 ja 80 tuntia. (King ym. 2012).



Kuva 21. Kolme PAV-vanhennettua bitumia kolmella eri vanhennusajalla esitettynä Black diagrammissa, jossa myös G-R-parametrin avulla määritetyt halkeilun vauriorajat. (Muokattu lähteestä King ym. 2012)

2.4 Vanhentuneen bitumin elvyttäminen

Suomessa paikanpäällä tapahtuvassa päällysteen kuumakierrätyksessä (Remmenetelmä) asfalttipäällysteen ylin kerros käytetään uudelleen osana uusittavaa päällysteen pintakerrosta. Kierrätetyn päällysteen sideainebitumin rakenne ja ominaisuudet riippuvat alkuperäisen bitumin lähtöominaisuuksista, bitumin vanhenemisesta käyttöaikana, mahdollisen lisätyn uuden sideaineen tai elvyttimen rakenteesta ja ominaisuuksista sekä kierrätysprosessin aikana tapahtuvista muutoksista sideaineeseen. Kierrätyksen

lopputuloksena olevan päällysteen sideaineen pitää pystyä saavuttamaan ja säilyttämään vaadittavat ominaisuudet, jotta päällyste kestää koko suunnitellun käyttöikänsä. Tästä syystä vanhentuneeseen kierrätettyyn bitumiin voidaan lisätä uutta tuoretta bitumia tai elvytintä palauttamaan sideaineen ominaisuuksia mahdollisimman lähelle sideaineen alkuperäisiä ominaisuuksia. (Karlsson ja Isacsson 2006).

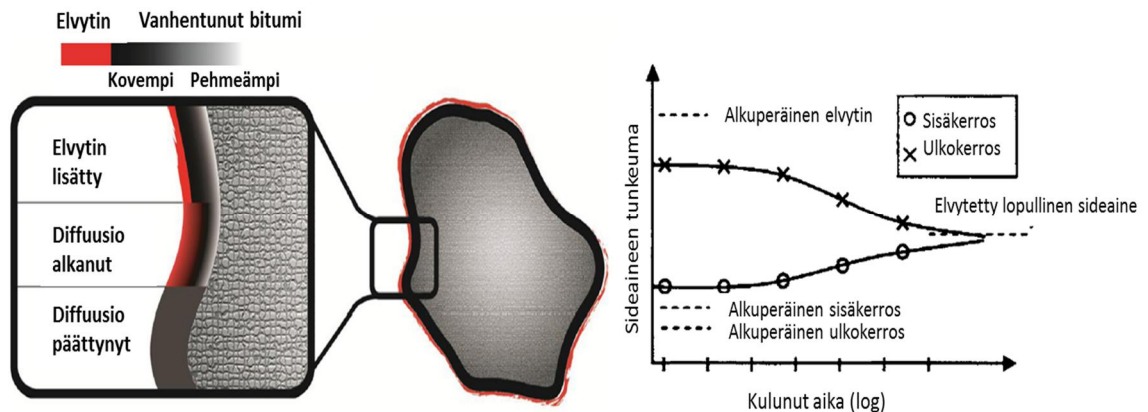
Bitumin elvyttämällä pyritään palauttamaan vanhentuneen bitumin ominaisuuksia alkuperäisiksi tai lähes alkuperäisiksi. Ominaisuuksien palauttaminen voidaan saavuttaa sekoittamalla vanhentuneeseen bitumiin tuoretta pehmeämpää bitumia, kasvattamalla asfalttimassan sideainepitoisuutta tai lisäämällä bitumiin niin kutsuttua elvytintä (Al-Qadi ym. 2007, Tran ym. 2012). Elvyttimillä tarkoitetaan yleensä asfalttimassan lisäaineita, joilla on alhainen viskositeetti ja ne voivat olla bitumisia, öljymäisiä tai orgaanisia materiaaleja. Osa elvyttimistä ainoastaan pehmentää bitumia, kun taas osan tarkoitus on pehennöksen ohessa palauttaa myös vanhentuneen päällysteen fysikaaliset sekä kemialliset ominaisuudet entisiksi (Karlsson ja Isacsson 2006, Shen ym. 2007). Tällä hetkellä Suomessa elvyttimenä käytetään vain pehmeää tiebitumia 650/900 (Makowska ja Pellinen 2016).

Tällä hetkellä markkinoilla on suuri määrä erilaisia elvytintyypppejä, joiden alkuperä, valmistustavat ja ominaisuudet eroavat huomattavasti keskenään. Ei ole olemassa tiettyä elvytintyyppiä, joka sopisi kaikkiin käyttökohteisiin ja -oloihin, joten elvytintyyppien tutkiminen pitää aina toteuttaa tapauskohtaisesti ja mahdollisimman kattavasti. Karlsson ja Isacsson (2006), Zaumanis ym. (2014b) sekä Zaumanis ja Mallick (2015) ovat kirjallisuusselvityksissään keränneet tietoa erilaisista asfaltin kierrätykseen liittyvistä elvytintutkimuksista. Tutkittaessa asfalttiruohon elvyttämistä asfalttiasemalla useiden eri elvytintyyppien (sekä öljy- että orgaanisperäiset) on tutkimusten mukaan havaittu kykenevän palauttamaan vanhentuneen bitumin ominaisuudet tasolle, joka vastaa tavoitellun tuoreen bitumiluokan vaatimuksia. Useimmissa tapauksissa elvyttäminen ei kuitenkaan onnistunut palauttamaan sideaineen työstettävyyttä tuoreen bitumin veroiseksi. Esimerkiksi Zaumanis ym. (2014a) havaitsivat, että korkeimmissa lämpötiloissa elvytetyn bitumin viskositeetti laski, mutta ei tuoreen bitumin veroiseksi, eli elvytetty bitumi vaati korkeampia massanvalmistus- ja päällysteen tiivistyslämpötiloja vastaavan työstettävyyden saavuttamiseksi. Myös laboratoriotutkimukset aiheesta ovat osoittaneet, että sopivalla elvytintyyppin ja -määrän valinnalla voidaan vanhentuneen asfalttiruohon jäykkyys alentaa tuoreen massan tasolle ja säilyttää silti hyvä deformaatiokestävyys.

Keskeistä bitumin elvyttämisen ja koko kierrätetyn asfalttimassan onnistumisessa on, kuinka hyvin asfalttiruohessa oleva vanha bitumi sekoittuu tuoreen bitumin sekä elvyttimen kanssa. Massan sekoitusprosessissa tavoitteena on, että kiviainesrakeiden ympärillä oleva vanha bitumi toimii sideaineen tavoin ja sekoittuu tasaisesti tuoreen bitumin sekä mahdollisen elvyttimen kanssa tasaiseksi kalvoksi kiviainesrakeiden ympärille. Eri tutkimusten (Chen ym. 2007, Al-Qadi ym. 2007) mukaan suuri osa sekoituksesta tapahtuukin edellä esitetyllä tavalla, mutta on myös huomattu, että osa asfalttiruohesta käyttäytyy niin sanottuna ”mustana kivenä” eli ilman vuorovaikutusta vanhan ja uuden sideaineen välillä. Tällainen epätäydellinen sideaineiden sekoittuminen voi johtaa aktiivisena toimivan sideainebitumin määrän aliarvioimiseen ja sitä kautta ongelmiin päällysteen kestävyudessa. (Zaumanis ja Mallick 2015).

Sideaineen eri komponenttien sekoittumiseen vaikuttaa mekaanisen sekoittumisen lisäksi komponenttien välillä tapahtuva diffuusio (Karlsson ja Isacsson 2006). Diffusiolla tarkoitetaan elvyttimen imeytymistä vanhentuneeseen bitumiin, mikä tasoittaa materiaa-

liien molekyylien pitoisuuseroja. Massan sekoitusvaiheessa elvytin muodostaa aluksi ohuen kalvon vanhan sideaineen peittämän kiviainesrakeen ympärille, minkä jälkeen elvytin alkaa tunkeutua vanhaan bitumiin ja samalla pehmentää sitä (kuva 22). Diffuusion nopeus on suurimmillaan korkeissa lämpötiloissa massan sekoituksen ja uusiopäällysteiden valmistuksen yhteydessä, mutta jatkuu päällysteessä, kunnes tasapaino on saavutettu. (Kuang ym. 2011, Zaumanis ja Mallick 2013). Diffuusion vaiheittainen eteneminen on todistettu useissa eri tutkimuksissa, joita on käyty läpi mm. lähteessä (Karlsson ja Isacson 2006). Jos kierrätetty päällyste avataan liian nopeasti liikenteelle, voi elvyttimen diffuusio vanhaan bitumiin olla vielä kesken. Tällöin kiviaineksen ympärillä olevan bitumikalvon uloimmassa kerroksessa on pitoisuudeltaan paljon elvytintä, mikä taas voi edesauttaa deformaatiourautumista, kun liian pehmeä bitumikalvon pinta hallitsee päällysteiden käyttäytymistä. (Zaumanis ja Mallick 2015).



Kuva 22. Kaaviokuva elvyttimen diffuusion eri vaiheista asfalttirouhkan sideaineeseen (vasen kuva) sekä diffuusion vaikutus sideaineen tunkeumaan ajan myötä (oikea kuva). (Muokattu lähteistä Zaumanis ym. 2014b sekä Karlsson ja Isacson 2006)

Sideaineen välisten komponenttien sekoittumiseen ja diffuusioon vaikuttavat merkittävästi aika ja lämpötila. Pidempi ainesosien sekoitus aika parantaa luonnollisesti komponenttien kokonaisvaltaisempaa sekoittumista. Korkeampi sekoitus- ja levityslämpötila helpottavat ja nopeuttavat sekoittumista ja diffuusiota, kun bitumiset aineet ovat pehmeämpiä. (Zaumanis ja Mallick 2015). Jos oletetaan, että sekoittuminen tapahtuu täydellisesti ja diffuusio toteutuu, voidaan sekoituksen lopputuloksena olevan sideaineen tunkeuma ja viskositeetti laskea Asfalttinormien (PANK 2011) kaavoilla 22 ja 23

$$\log(\text{pen}_{\text{mix}}) = a \log(\text{pen}_1) + b \log(\text{pen}_2) \quad (22)$$

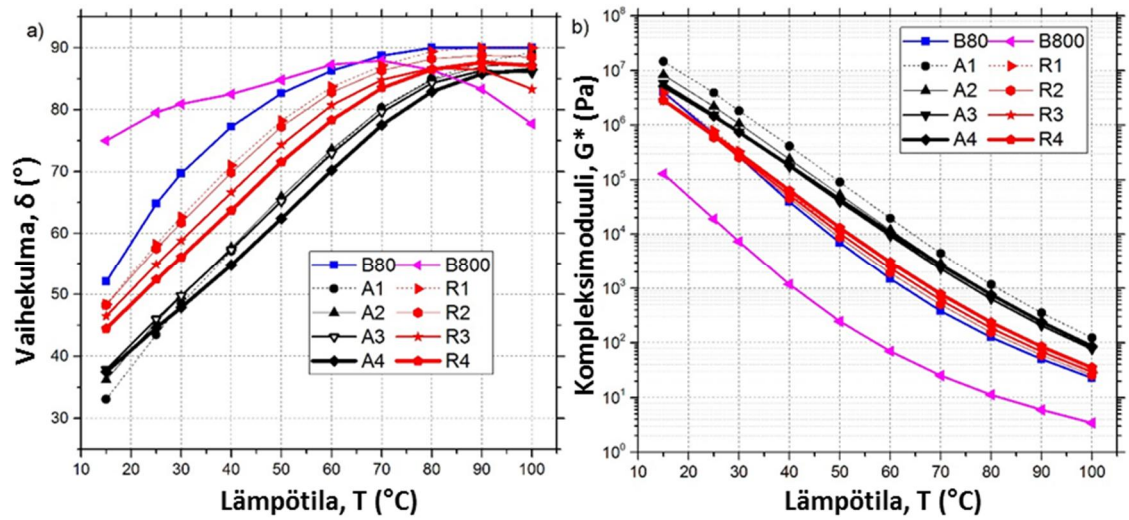
$$\log(\log(\text{visc}_{\text{mix}})) = a \log(\log(\text{visc}_1)) + b \log(\log(\text{visc}_2)), \quad (23)$$

jossa pen_{mix} = valmistettavan massan sideaineen laskennallinen tunkeuma
 pen_1 ja pen_2 = sekoitettavien bitumien tunkeumat
 visc_{mix} = valmistettavan massan sideaineen laskennallinen viskositeetti
 visc_1 ja visc_2 = sekoitettavien komponenttien viskositeetit
 a ja b = bitumien tai elvyttimen osuudet (massa- %) valmistettavassa seoksessa ($a + b = 1$).

Suomessa bitumin elvyttämistä on tutkittu jo pitkään. Lahtinen (1984) tutki diplomityössään erilaisten elvyttimien sekoittumista bitumin kanssa ja totesi, että bitumiset elvyttimet sekoittuvat öljymäisiä elvyttimiä paremmin vanhentuneeseen bitumiin. Toisaalta tutkimusten (Lahtinen 1984, Wastimo 1995) mukaan bitumisten elvyttimien

pehmenysvaikutus ei ole niin merkittävä kuin öljyisillä elvyttimillä, joten niitä tarvitaan enemmän saman pehmenysvaikutuksen aikaansaamiseksi. Tämä taas saattaa aiheuttaa liian korkeita sideainepitoisuuksia. Patosalmi tutki (1996) diplomityössään erilaisen sideaineiden toimintaa elvyttiminä Rem-päälystystöissä sekä miten elvyttimiä Suomessa käytetään. Tutkimuksessa verrattiin eri elvytettyjen massojen halkaisuvetolujuuksia, mutta tulokset vaihtelivat massakohtaisesti paljon, eikä yksiselitteisiä päätelmiä voitu tehdä. Tutkimuksessa haastateltiin myös elvyttimien käyttökokemuksia Rem-töissä. Yleisimmin elvyttiminä käytettiin mäntyöljypikeä sekä myös pehmeää bitumia 650/900. Käytöstä on ollut yleensä hyviä kokemuksia ja elvyttimien käytöllä on koettu olevan hyötyä. Elvyttimen sekä lisämäärän määrät ja niiden säätäminen on tuottanut eniten ongelmia, koska määriä on vaikeaa arvioida etukäteen, jolloin ne joudutaan säätämään silmämääräisesti valmista päälysteen pintaa arvioiden päälystystyön alussa. Suomessa kaikissa Rem-päälystystöissä käytetään tällä hetkellä samaa elvytintyyppiä, joka on 650/900-bitumia (Makowska ja Pellinen 2016).

Blomberg ym. (2016) tekivät osana Liikenneviraston Rem-tutkimusta laboratoriokokeen, jossa tutkittiin miten bitumin 70/100 ominaisuudet muuttuvat, kun bitumia vanhennetaan ja elvytetään pehmeällä tiebitumilla 650/900 useita kertoja peräkkäin. Tutkimuksen perusteella arvioitiin, että bitumi vanhenee ja kovettuu kaikkein eniten ensimmäisen vanhennuksen aikana, minkä jälkeen vanheneminen hidastuu. Elvyttämällä pystyttiin palauttamaan tavoitellut bitumin fysikaaliset ominaisuudet, kuten tunkeuma- tai kompleksimoduuliarvot, alkuperäisiksi, jos käytettiin oikeaa sekoitussuhdetta. Tutkimuksessa elvytintä tarvittiin noin 21 - 33 % suhteessa vanhennettuun bitumiin, mikä on huomattavasti enemmän, mitä Rem-menetelmässä yleensä käytetään (2 - 4 %), sillä kierrätettyyn päälysteeseen mahtuu vain rajallinen määrä elvytintä. Elvyttämällä ei tutkimuksen mukaan kuitenkaan pystytty palauttamaan bitumin viskoosia osuutta alkuperäiselle tasolle, eli elvytetyn bitumin vaihekulmat jäivät alkuperäistä pienemmiksi. Tällainen elastisuuden kasvu heikentää bitumin kykyä relaksoida jännityksiä, mikä saattaa aiheuttaa ongelmia päälysteessä. Vastaavanlaisia tuloksia elastisuuden kasvusta on saatu myös muissa tutkimuksissa (Dony ym. 2013). Kuvassa 23 on esitetty tutkimuksen (Blomberg ym. 2016) tuloksia, miten bitumin vaihekulma ja kompleksimoduuli muuttuvat eri vanhennuksen ja elvyttämisen vaiheissa lämpötilan suhteen. Kompleksimoduulin kuvaajasta voidaan havaita, että vanheneminen muuttaa bitumin lämpötilaherkkyyttä, jota ei elvyttämällä voida palauttaa. Elvyttämällä bitumin jäykkyys (G^*) voidaan palauttaa esimerkiksi tunkeuma-lämpötilan osalta entiseksi, mutta koska lämpötilaherkkyys on muuttunut, on elvytetty bitumi pehmeämpää kylmissä lämpötiloissa ja vastavasti jäykempää korkeammissa lämpötiloissa. Elvyttämällä ei myöskään pystytty palauttamaan alkuperäisen bitumin kemiallisia ominaisuuksia.



Kuva 23. Vaihekulman (a) ja kompleksimoduulin (b) isokroniset käyrät taajuudella 1,59 Hz vanhennus-elvytysprosessin eri vaiheissa. (Muokattu lähteestä Blomberg ym. 2016)

3 Laboratoriotutkimukset

3.1 Tutkimusaineisto ja tutkimusmenetelmät

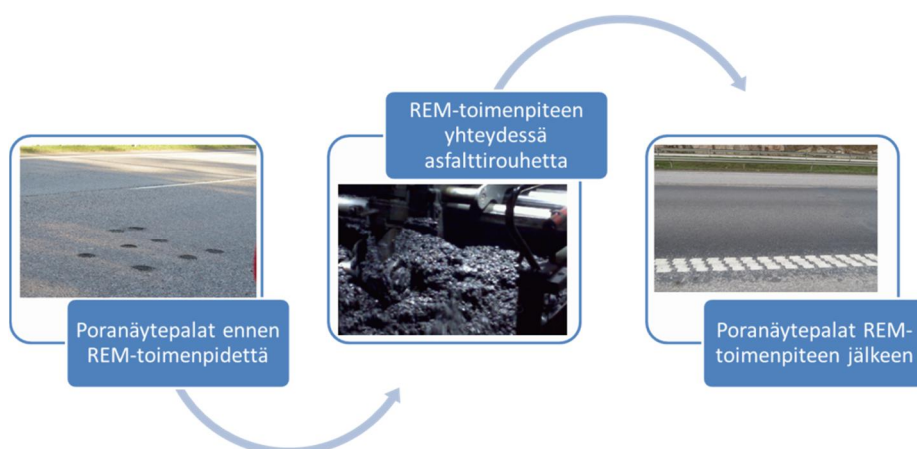
Rem-toimenpide tehtiin 26,5 km pitkälle tieosuudelle ja se koostui eri osista, joissa oli erilainen päällysteen ylläpitohistoria ja nämä tiedot on kerätty taulukkoon 1. Lisämassan sideaineena käytettiin venäläisestä raakaöljystä valmistettua bitumiluokaltaan 70/100 olevaa bitumia, jota käytettiin tutkimuksessa myös referenssinä. Uudelleen päällystettävä osuus jaettiin neljään alueeseen, joista näytteitä kerättiin. Alueilla 1 ja 4 päällysteen edellinen ylläpito-toimenpide oli ollut massatasaus ja laatta vuonna 2008 ja 2009. Näillä alueilla päällysteen kulutuskerros kierrätettiin siis ensimmäisen kerran Rem-toimenpiteellä. Alueella 1 tietoa alkuperäisen (vuonna 2008) massan bitumilaadusta ei ollut saatavilla, mutta se oletettiin 70/100-bitumiksi. Alueella 4 alkuperäinen bitumi oli oletettavasti bitumiluokaltaan 50/70-bitumia. Alueella 2 päällysteen edellinen toimenpide oli ollut Rem vuonna 2008, joten päällysteen kulutuskerros kierrätettiin Rem-toimenpiteellä nyt toisen kerran. Alkuperäisen asfalttimassan (vuoden 2003) sideaineen bitumitietoja ei ollut myöskään tarjolla, mutta vuoden 2008 Rem-toimenpiteessä lisämassan bitumi oli luokkaa 70/100. Alueella 3 päällysteen kaksi edellistä toimenpidettä olivat olleet Rem (vuonna 2004 ja 2008), joten päällysteen kulutuskerros kierrätettiin Rem-toimenpiteellä jo kolmannen kerran. Tälläkään alueella alkuperäisestä bitumilaadusta (vuoden 1995) ei tietoja ollut saatavilla. Alueella 3 alkuperäisen massan päällystys tehtiin jo vuonna 1995 ja, koska raakaöljypohjaltaan venäläisen bitumin käyttö aloitettiin vasta 1990-luvulla, saattaa alkuperäisen massan bitumi olla raakaöljypohjaltaan myös muualta kuin Venäjältä. Kaikkien muiden osuuksien bitumit voidaan olettaa raakaöljypohjaltaan venäläisiksi. Näytekoodin ensimmäinen merkki (kuvat 26 ja 27) kuvaa, mistä alueesta on kyse. Tutkimuksen alkaessa alkuperäisistä tiellä olevista bitumilaaduista ei ollut saatavilla tietoa ja tutkimuksessa kaikkien näytteiden alkuperäiseksi bitumilaaduksi oletettiin 70/100, minkä perusteella tutkimuksen analyysi on tehty.

Taulukko 1. Tutkittujen alueiden kunnossapitohistoria.

	Alkuperäisen massan päällystys	1. Rem	2. Rem	3. Rem	Alkuperäisen massan bitumi	Aikaisempien lisämassojen bitumi	Massassa olleet hienoineet ennen 2013
Alue 1	2008	2013	-	-	ei tietoa (oletettu 70/100)	-	Kalkkifilleri
Alue 2	2003	2008	2013	-	ei tietoa	70/100 (vuoden 2008 Rem)	Kalkkifilleri ja lentotuhka
Alue 3	1995	2004	2008	2013	ei tietoa	70/100 (vuoden 2008 Rem)	Kalkkifilleri ja lentotuhka
Alue 4	2009	2013	-	-	50/70 (ei varma tieto)	-	Lentotuhka

Näytteitä porattiin kultakin alueelta sekä ennen että jälkeen Rem-toimenpiteen, jotta toimenpiteen vaikutusta pystyttiin tutkimaan. Ennen toimenpidettä poratuista näytteistä haluttiin tutkia, kuinka paljon asfalttimassa ja erityisesti massan sideainebitumi oli vanhentunut käytössä. Rem-toimenpiteen jälkeen poratuista näytteistä taas yritettiin selvittää, miten toimenpide muutti asfalttimassan ja sideaineen ominaisuuksia, sekä erityisesti onnistuiko elvytys palauttamaan sideaineen ominaisuuksia alkuperäisiksi. Lisäksi Rem-toimenpiteen yhteydessä myös asfalttirouhetta kerättiin talteen tutkimuksia varten. Näi-

den näytteiden tarkoitus oli selvittää, miten asfalttimassa ja sen bitumi vanhenivat Rem-toimenpiteen yhteydessä ennen uuden massan ja elvyttimen lisäystä. Kuvassa 24 on esitetty havainnekaavio tutkimuksessa otetuista näytteistä.



Kuva 24. Tutkimuksen näytteenottosuunnitelma.

Tutkimuksen aineisto koostui Rem-toimenpiteen yhteydessä tieltä poratuista näytteistä sekä asfalttirouhenäytteistä uutetusta bitumista, lisämassassa käytetystä tuoreesta 70/100-bitumista ja sen RTFOT-vanhennetusta näytteestä sekä elvytinbitumista 650/900. Tutkittavat poranäytteet olivat kivimastiksiasfalttia (SMA). Poranäytteistä tehtiin kattavat materiaalitestit, jotka on esitetty lähteessä (Makowska ja Pellinen 2016) ja tässä diplomityössä esitetään vain sideainetutkimukset. Taulukossa 2 on käytetyt poranäytteiden tutkimusmenetelmät sekä poranäytteiden sideainekokeiden menetelmätiedot.

Taulukko 2. Poranäytteiden ja niistä uutettujen bituminäytteiden menetelmätiedot.

Ominaisuus	Menetelmä
Asfalttinäytteen tyhjätilan määrittäminen	SFS-EN 12697-8
Sideaineen uuttaminen kiviaineksesta ja sideainepitoisuuden määrittäminen	SFS-EN 12697-1
Sideaineen talteenotto haihdutusmenetelmällä	SFS-EN 12697-3
Sideaineen tunkeuman määrittäminen	SFS-EN 1426
Fraass-murtumispisteen määrittäminen	SFS-EN 12593
Sideaineen kompleksisen leikkausmoduulin ja vaihekulman määrittäminen (DSR)	SFS-EN 14770 / AASHTO T 315-10
Sideaineen deformaatiokestävyyden määrittäminen (MSCR) DSR:n avulla	AASHTO TP 70-11 (standardiluonnos)
Sideaineen väsymiskestävyyden määrittäminen (LAS-testi)	AASHTO TP 101-12 (standardiluonnos)

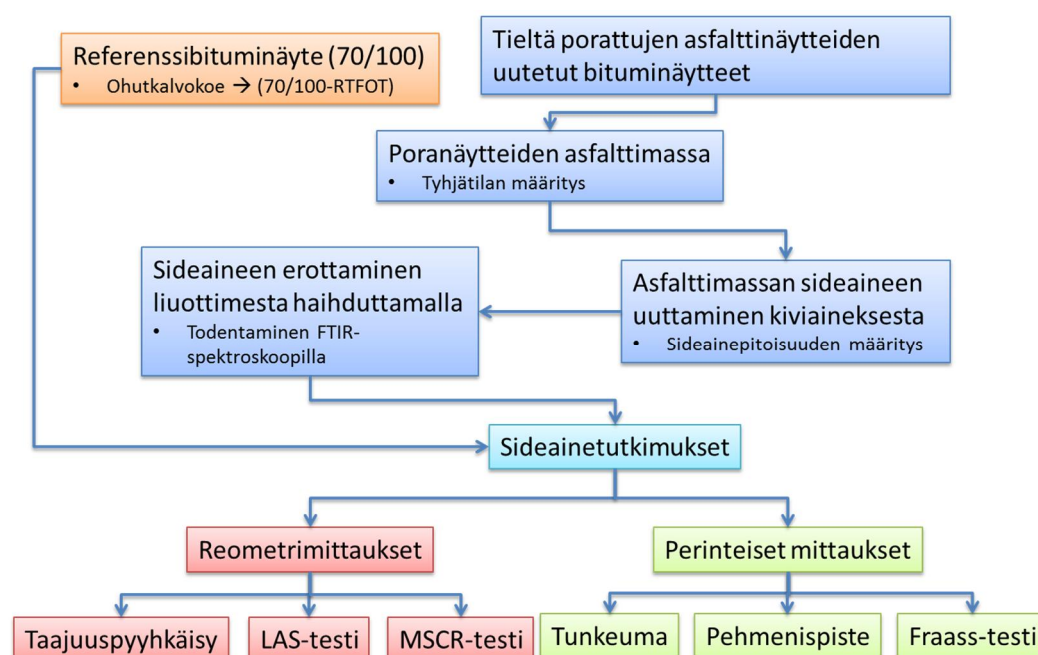
Poratuista asfalttinäytteistä määritettiin tyhjätila, minkä jälkeen sideaine eroteltiin asfalttimassasta automaattisella uuttosuodatuslaitteistolla (Strassentest tyyppi 520) metyleenikloridin avulla. Tyhjätila määritettiin asfalttinäytteiden kappaleitiheyksien ja asfalttimassan maksimitiheyden avulla standardien SFS-EN 12697-6 (menettely B) ja SFS-

EN 12697-5 (menettely B) mukaan. Uuttosuodatuksen yhteydessä määritettiin myös asfalttinäytteen sideainepitoisuus. Seuraavaksi sideaineesta poistettiin haihdutusmenetelmällä uuttosuodatuksen yhteydessä liuennut metyleenikloridi. Haihdutus tehtiin Buchi Rotavapor R-205 -laitteistolla. Haihdutuksen onnistuminen oli mahdollista todentaa FTIR-spektroskoopilla (engl. Fourier transform infrared spectroscopy). Sideainetutkimuksessa käytettävät menetelmät käsitellään tarkemmin luvussa 3.3.

Tutkittavaan aineistoon kuului myös lisämassassa käytetty tuore bitumi (70/00), jota käytettiin tutkimuksessa referenssinä. Referenssibitumille tehtävät sideainetutkimukset on esitetty taulukossa 3. Referenssibitumille tehtiin Fraass-murtumispistettä lukuun ottamatta samat testit kuin muille sideainenäytteille. Lisäksi referenssibitumille määriteltiin pehmenemispiste sekä tehtiin ohutkalvokoe. Ohutkalvokokeesta saadulle RTFOT-vanhennetulle bitumille (70/100-RTFOT) tehtiin samat kokeet kuin referenssibitumille (70/100). Myös elvytinbitumi 650/900 tutkittiin vastaavalla tavalla. Kuvassa 25 on havainnollistettu tutkimuksen rakennetta ja sen eri osa-alueita.

Taulukko 3. Referenssibitumien menetelmätiedot.

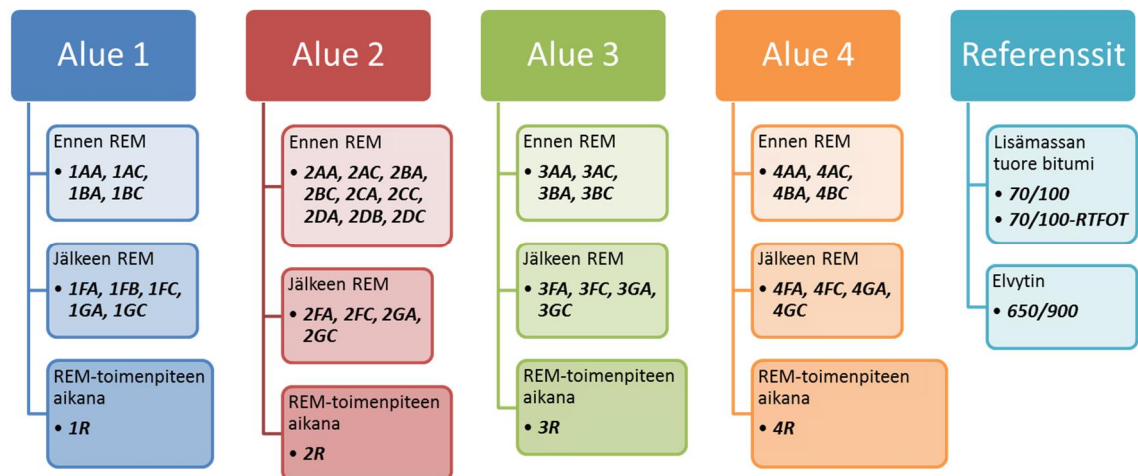
Ominaisuus	Menetelmä
Sideaineen tunkeuman määrittäminen	SFS-EN 1426
Pehmenemispisteen määrittäminen	SFS-EN 1427
Ohutkalvokoe (RTFOT-menetelmä)	SFS-EN 12607-1
Sideaineen kompleksisen leikkausmoduulin ja vaihekulman määrittäminen (DSR)	SFS-EN 14770 / AASHTO T 315-10
Sideaineen deformaatiokestävyyden määrittäminen (MSCR) DSR:n avulla	AASHTO TP 70-11 (standardiluonnos)
Sideaineen väsymiskestävyyden määrittäminen (LAS-testi)	AASHTO TP 101-12 (standardiluonnos)



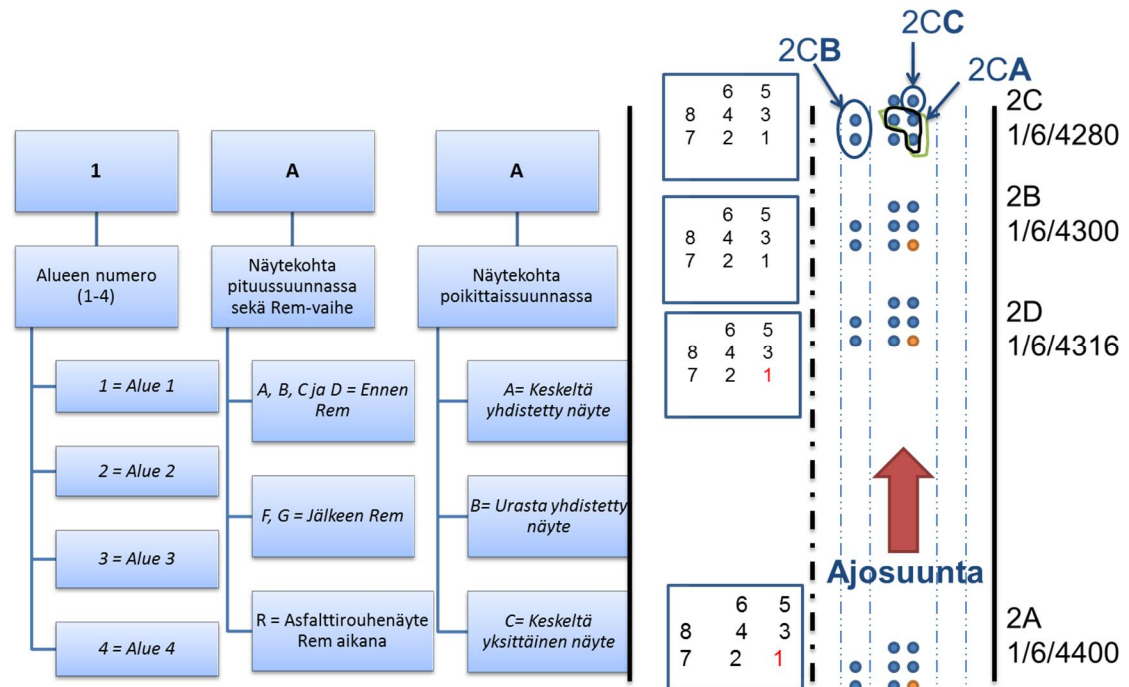
Kuva 25. Koesuunnitelma ja tehdyt testit.

3.2 Näytteenotto sekä tutkitut materiaalit

Tutkimuksessa tieltä porattiin yhteensä 165 poranäytepalaa, joista saatiin uutettuja bituminäytteitä yhteensä 54. Osa bituminäytteistä koostui ainoastaan yksittäisen asfaltti-porapalan sideaineesta, kun taas osa näytteistä oli yhdistelmä vierekkäisten porapalojen sideaineesta. Tätä diplomityötä varten näistä 54 näytteestä reometrijot tehtiin 38 bituminäytteelle. Lisäksi tutkimukseen kuului asfalttirouheesta kerätyt näytteet, referenssinä käytetty tuore 70/100-bitumi ja sen RTFOT-vanhennettu näyte sekä elvyttimenä käytetty pehmeä bitumi 650/900. Yhteensä tutkittavia bitumeja oli siis 45. Kuvassa 26 on lista tutkimuksen bituminäytteistä ja kuvassa 27 on esitetty näytteiden selitteet näytekoodin avulla.



Kuva 26. Tutkitut näytteet.



Kuva 27. Näytekoodien selitykset.

Näytteitä porattiin kahdesta eri paikasta sadan metrin päästä toisistaan sekä ennen että jälkeen Rem-toimenpiteen jokaiselta alueelta. Tämä kertoi kuinka tasalaatuisia näytteet olivat samalta alueelta, mutta eri kohdasta pituussuunnassa. Näytekoodin toinen merkki kuvastaa näytekohtaa pituussuunnassa sekä Rem-toimenpiteen vaihetta. Kirjaimet A ja

B kuvaavat ennen Rem-toimenpidettä otettuja näytteitä, jotka olivat sadan metrin päästä toisistaan. Vastaavasti kirjaimet F ja G kuvaavat näytteitä Rem-toimenpiteen jälkeen. Alueella 2 oli lisäksi näytekohdat C ja D, jotka olivat erityisen vaurioituneita kohtia tiessä ennen Rem-toimenpidettä. Näytekoodin toisena merkinä oleva R-kirjain kuvaa asfalttirouheesta uutettua bituminäytettä.

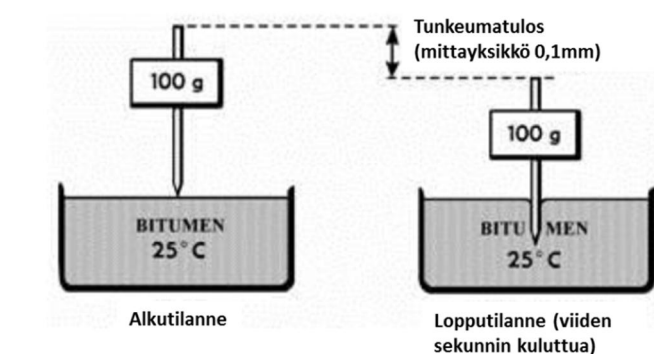
Jokaisesta alueen pituussuuntaisesta näytekohdasta porattiin kahdeksan näytettä. Näytteistä kuusi oli keskeltä ajokaistaa ja loput kaksi ajourasta. Näytekoodin kolmas merkki kuvaa poranäytteen kohtaa poikittaissuunnassa. Koodi kertoo myös koostuiko sideainenäyte yhdestä vai useammasta poranäytepalasta. Tämän tarkoituksena oli selvittää, vaikuttiko uutetun bitumin määrä mittaustuloksiin. Kirjain A kuvaa näytettä, joka oli keskeltä ajokaistaa ja koostui kolmesta porapalan bitumista. Kirjain B kuvaa näytettä, joka oli ajourasta ja koostui kahdesta porapalan bitumista. Kirjain C kuvaa näytettä, joka oli keskeltä ajokaistaa ja koostui yksittäisen porapalan bitumista. Kuvan 27 oikeassa reunassa on esitetty esimerkkikuva bitumin näytekoodin selitteestä.

3.3 Tutkimusmenetelmien kuvaus

3.3.1 Perinteiset mittaussuunnitelmat

Perinteisten mittaussuunnitelmien tarkoitus oli antaa referenssiä ja vertailuarvoja reometrillä saataviin tuloksiin, jotka ovat menetelminä vielä melko tuntemattomia. Koska porapaloista uutettu bitumin määrä oli rajallinen, ei näytteistä mitattu pehmenemispistettä, jotta bitumia jäisi enemmän reometrillä tehtäviin mittauksiin.

Kaikilta tutkimuksen bituminäytteiltä mitattiin tunkeuma standardin SFS-EN 1426 mukaan. Tunkeumatesti on yleisin bitumin testausmenetelmä ja sillä kuvataan bitumin kovuutta ja konsistenssia yleensä 25 °C:n lämpötilassa. Testissä (kuva 28) mitataan kuinka paljon 100 g:lla kuormitettu neula tunkeutuu bituminäytteeseen viiden sekunnin aikana. Tunkeuman tulos ilmoitetaan mittayksikössä 1/10 mm.



(a)

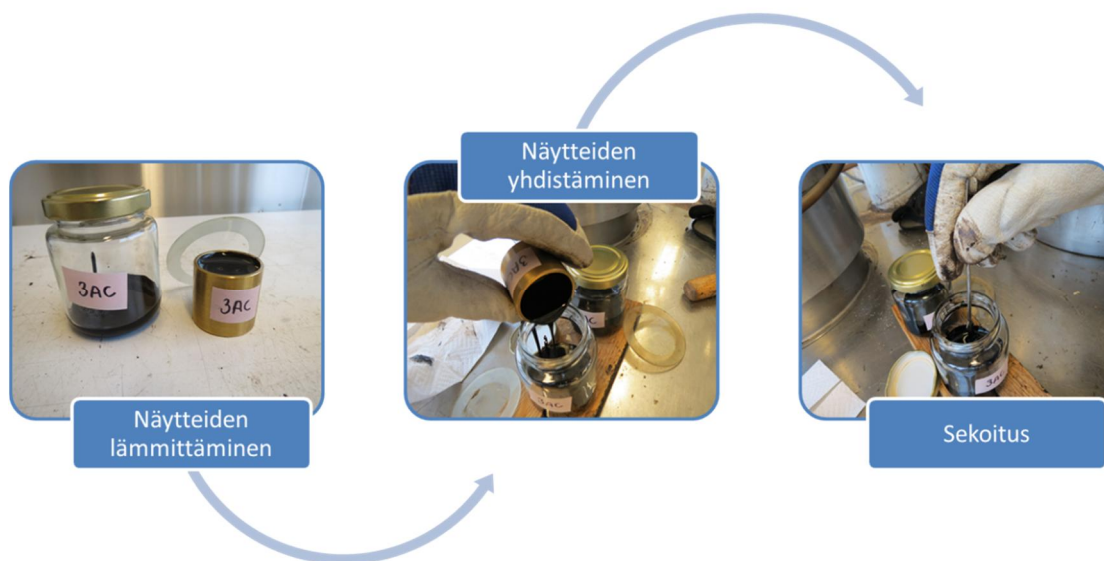


(b)

Kuva 28. Tunkeumatesti.

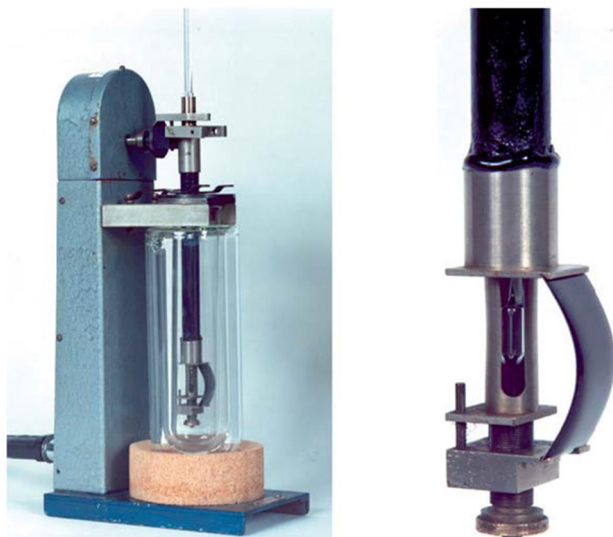
Suuri osa poranäytteestä saatavasta bitumimäärästä tarvittiin tunkeuma-testin tekemiseen. Koska tunkeuma tehtiin ensimmäisenä poranäytteiden uuton ja haihdutuksen jälkeen, käytettiin tunkeuman määrittämisessä käytettyä bitumia uudestaan muissa testeissä. Tästä syystä tunkeumakupissa oleva bitumi piti yhdistää poranäytteestä saadun lopun bitumin kanssa (kuva 29). Tässä tutkimuksessa ennen näytteiden yhdistämistä ne pidettiin uunissa 145 °C:ssa puoli tuntia, jotta bitumista tuli juoksevaa. Näytteet yhdistettiin

kannelliseen lasipurkkiin, sekoitettiin hyvin ja säilöttiin suljettuina jääkaappiin muita testejä varten.



Kuva 29. Havainnekuva bitumin näytteen yhdistämisestä.

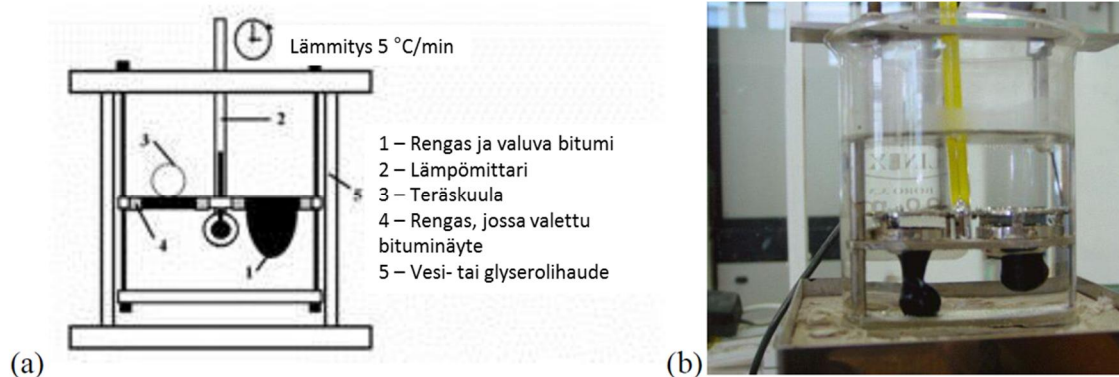
Bituminäytteille mitattiin myös Fraass-murtumispiste (SFS-EN 12593), joka kuvaa bitumin kylmäominaisuuksia. Mittausmenetelmässä (kuva 30) 0,5 mm paksuinen bitumikerros levitetään peltilevylle (41 mm x 20 mm), jota aletaan jäähdyttää nopeudella 1 °C/min. Jäähdytyksen yhteydessä levyä myös taivutetaan kerran minuutissa aiheuttaen bitumiin 1,6 % venymän. Taivutusta jatketaan kunnes bitumi alkaa murtua, koska se ei pysty enää venymään alhaisen lämpötilan vuoksi. Lämpötila, jossa murtuminen alkaa, on Fraass-murtumispiste. (Blomberg 1990).



Kuva 30. Fraass-testi.

Tutkimuksessa oleville referenssibitumeille määritettiin vielä lisäksi pehmenemispiste rengas-kuula -menetelmällä (SFS-EN 1427). Koska bitumilla ei ole selvää sulamispistettä, vaan se pehmenee lämpötilan noustessa, on bitumin pehmenemiselle kehitelty erilaisia empiirisiä määrittystapoja. Rengas-kuula -menetelmässä (kuva 31) renkaaseen valetun bituminäytteen päälle asetetaan 3,5 g teräskuula. Näyte on vesi- tai glyserolihauteessa, jota aletaan lämmittää vakionopeudella 5 °C/min. Bitumin lämmitessä se

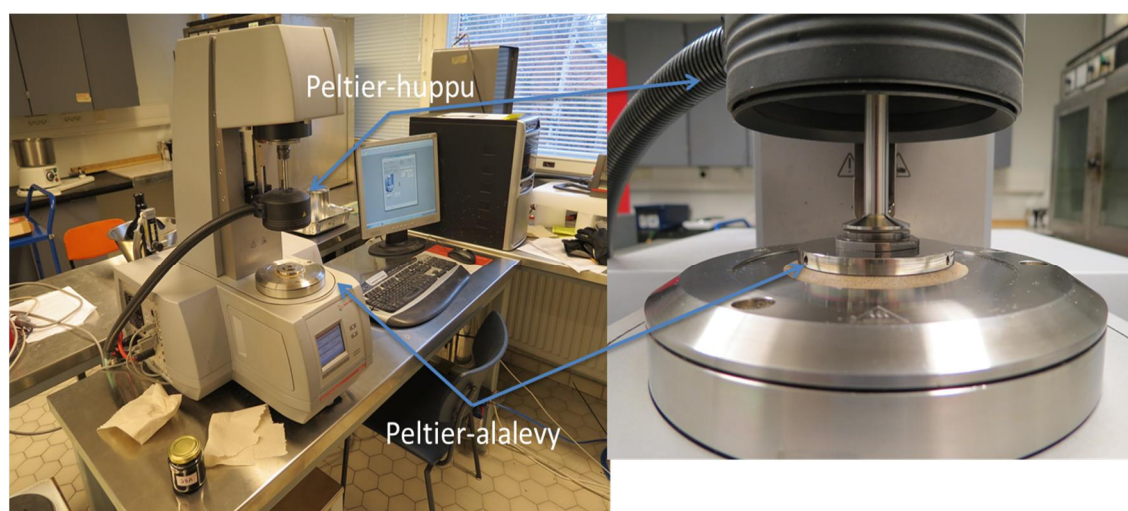
alkaa pehmentyä ja teräskuula alkaa valua bitumin mukana. Lämpötila, jossa kuula on valunut 25 mm, määritellään bitumin pehmenemispisteeksi.



Kuva 31. Pehmenemispiste-testi.

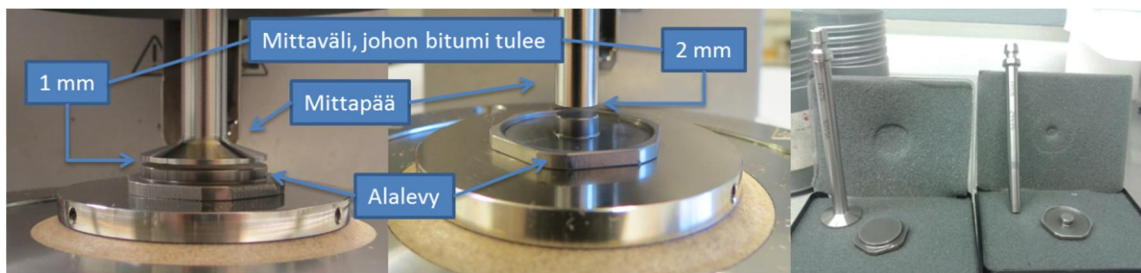
3.3.2 Reologiset mittaukset

Bituminäytteiden reologiset mittaukset tehtiin dynaamisella leikkausreometrillä (engl. Dynamic Shear Rheometer, DSR), jonka malli oli Anton Paar MCR 302 (kuva 32). Reometri oli jännitysohjattu, mutta se toimi myös muodonmuutosohjatusti. Tässä tutkimuksessa reometriä käytettiin muodonmuutosohjatussa tilassa, eli laite sääteli näytteen kohdistuvaa leikkausmuodonmuutoksen suuruutta ja mittasi muodonmuutoksen aiheuttamaa leikkausjännitystä. Reometri oli varustettu myös Peltier-alalevyllä sekä -hupulla, joilla pystyttiin kontrolloimaan mittauslämpötiloja erittäin tarkasti ja tasaisesti koko bituminäytteessä.



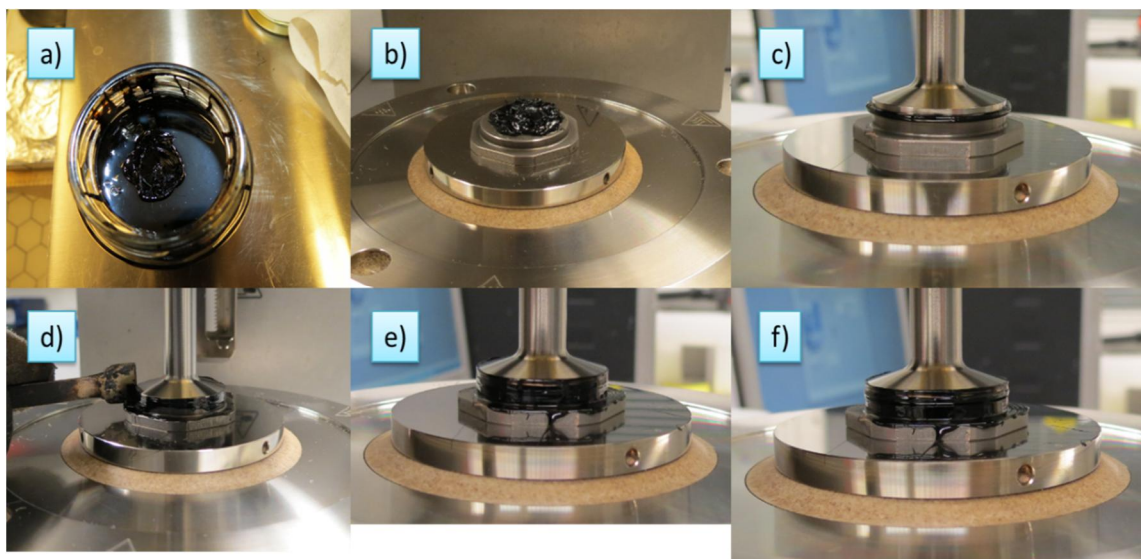
Kuva 32. Anton Paar MCR 302 -reometri

Bituminäytteille tehtiin taajuuspyyhkäisymittaukset, LAS-testi sekä MSCR-testi. Lisäksi muutamalle näytteelle tehtiin muodonmuutospyyhkäisy tulosten oikeellisuuden varmistamiseksi. Tutkimuksen mittaukset tehtiin kahdella eri mittausgeometrialla, jotka olivat 8 mm levy-levy-geometria (PP 8) sekä 25 mm levy-levy-geometria (PP 25) (kuva 33). Mittausgeometriat siis koostuvat paikallaan pysyvistä alalevystä sekä liikkuvasta mittapästä, joiden halkaisijat ovat 8 ja 25 mm. Mittauslämpötilan ollessa korkeampi, jolloin bitumi on pehmeämpää, käytetään mittausgeometriaa PP 25 ja vastaavasti kylmemmissä lämpötiloissa mittausgeometriaa PP 8. Tutkimuksessa geometrialle PP25 mittausväli (alalevyn ja mittapään väliin jäävä korkeus, jossa bituminäyte on) oli 1 mm ja geometrialle PP 8 2 mm.



Kuva 33. Reometrin mittausgeometriat ja niiden mittavälit.

Kaikissa mittauksissa näytteen valmistus tehtiin samalla tavalla sekä standardeja AASHTO T315-10 ja SFS-EN 14770 pääosin mukaillen. Näytteen valmistuksen päävaiheet on esitetty kuvassa 34. Tutkimuksessa koko bituminäytettä ei enää lämmitetty, vaan tarvittava määrä siirrettiin kuumalla lusikalla reometrin alalevylle (vaiheet a ja b). Tällä tavalla säästettiin koko näytteen turhalta lämmittämiseltä ja varmistettiin, että kaikissa mittauksissa bituminäytteillä oli samanlainen lämmityshistoria. Levy oli lämmitetty bituminäytteen tunkeuman mukaan trimmauslämpötilaan 50 tai 60 °C. Trimmauslämpötilassa bitumin piti olla tarpeeksi pehmeää, ettei näytteenvalmistuksen yhteydessä bituminäytteeseen jäänyt jännitystiloja. Toisaalta bitumi ei myöskään saanut olla liian pehmeää ja nestemäistä, jolloin näyte saattoi valuta pois mittavälistä. Bituminäyte otettiin pintakerroksen alta, jottei bitumin pinnalla tapahtuva kovettuminen vaikuttaisi mitaustuloksiin. Tämän jälkeen mittapää laskettiin trimmausasentoon (vaihe c), joka oli 25 mm mittapäällä 1,050 mm ja 8 mm mittapäällä 2,050 mm. Näytteen annettiin tasaantua trimmauslämpötilassa 5 minuutin ajan ennen kuin trimmaus aloitettiin. Trimmauksessa (vaihe d) ylimääräinen bitumi poistettiin kuumalla spatulalla niin, että bitumia oli vain mittauslevyjen välissä (vaihe e). Lopuksi mittapää laskettiin vielä mittausasentoon (vaihe f), joka 25 mm mittapäällä oli 1,000 mm sekä 8 mm mittapäällä 2,000 mm.



Kuva 34. Näytteen valmistuksen vaiheet reometrillä.

Taajuuspyyhkäisymittauksessa tutkitaan bitumin lämpötila- ja aikariippuvaista muodonmuutoskäyttäytymistä. Testi suoritettiin standardeja AASHTO T315-10 ja SFS-EN 14770 pääosin mukaillen. Mittaukset tehtiin muodonmuutosohjatusti niin, että pysyttiin LVE-alueella (kts. kappale 2.2.1). Testissä mitattiin kompleksimoduulin sekä vaihekulman arvoja erilaisilla taajuuksilla sekä lämpötiloilla. Testissä kussakin lämpötilassa suoritettiin taajuuspyyhkäisy taajuudesta 0,01 Hz taajuuteen 10 Hz. PP 8-

mittausteometriaa käytettiin lämpötilavälillä 0...40 °C kymmenen asteen välein sekä lämpötilassa 25 °C (vertailu tunkeuma-arvon kanssa) ja PP 25-mittausteometriaa lämpötilavälillä 30...90 °C kymmenen asteen välein. Lämpötiloissa 30 ja 40 °C mittaukset tehtiin molemmilla mittausteometrioilla, joiden avulla todennettiin mittaustulosten yhtenevyys. Tämä analyysi tehtiin liitteessä A. Poranäytepaloista saaduilla bituminäytteillä koko taajuuspyyhkäisytesti tehtiin samoilla muodonmuutoksen amplitudiarvoilla, jotka on esitetty taulukossa 4. Arvot valittiin tarpeeksi pieniksi, jotta bitumin käyttäytyminen säilyi LVE-alueella. Tuoreille referenssibitumeille, jotka olivat huomattavasti muita tutkittuja bitumeja pehmeämpiä, käytettiin suurempia muodonmuutoksia, koska toisaalta liian pienet muodonmuutokset saattoivat aiheuttaa mittauslaitteen resoluutio-ongelmia.

Taulukko 4. Taajuuspyyhkäisytestin mittaustiedot.

Lämpötilaväli (°C)	Mittausteometria	Taajuus-alue (Hz)	Muodonmuutoksen amplitudi (%)	Mitatut parametrit
0-40	PP 8	0,01-10	0,05	G*, δ
30-90	PP 25	0,01-10	1	G*, δ

Lineaarisella amplitudipyhkäisytestillä (LAS = Linear Amplitude Sweep) pyritään kuvaamaan bitumin viskoelastista väsymistä ja kestävyyttä asfalttipäällysteessä. Tutkimuksessa käytetty testi perustui pääosin AASHTO TP101-12 standardiluonnokseen. Testi tehtiin mittausteometriallla PP 8 ja standardiluonnoksesta poiketen lämpötilassa 10 °C. Luonnoksessa suositeltiin käyttämään bitumin PG-luokituksen keskilämpötilaa, jota tietoa tutkituista bitumeista ei ollut. Testi koostui kahdesta osasta (taulukko 5). Ensimmäinen osa oli taajuuspyhkäisy, jossa mittauksen taajuutta kasvatettiin 0,1 Hz:stä 30 Hz:iin muodonmuutosamplitudin ollessa vakio 0,1 %. Taajuuspyhkäisyllä selvitettiin näytteen viskoelastiset ominaisuudet lineaarisella alueella (LVE-alue). Tämän jälkeen näytteelle tehtiin muodonmuutospyhkäisy, jossa mittauksen taajuus pidetään vakiona (10 Hz), mutta muodonmuutoksen amplitudia alettiin kasvattaa 0,1 %:sta 30 %:iin. Tässä osassa pyrittiin selvittämään, miten bituminäyte pystyi vastustamaan väsymisvaurioita. Mittaustuloksista laskettiin VECD-analyysin (viscoelastic continuum damage) avulla materiaalin väsymistä kuvaava malli, joka on muotoa:

$$N_f = A(\gamma_{max})^{-B}, \quad (24)$$

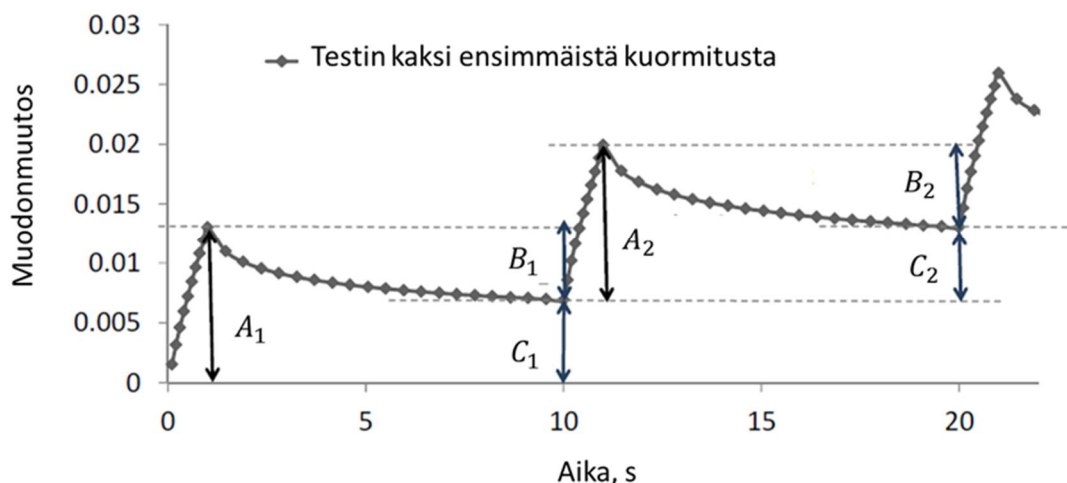
jossa N_f = väsymisvaurioparametri tietyllä maksimivenymällä [kpl]
 γ_{max} = oletettu päällysteen sideaineen maksimivenymä tietyllä päällysterakenteella [%]
 A, B = VECD-analyysillä mittaustuloksista lasketut parametriarvot [-].

LAS-testin tulosten analysoinnin tueksi testin standardiluonnokseen on kehitetty valmis Excel-tiedosto, joka laskee mittaustulosten perusteella parametrit, joiden avulla väsymisvaurioparametri voidaan laskea (AASHTO TP 101-12). LAS-testiä käytetään standardin mukaan vain vanhentuneille ja vanhenneetuille näytteille. Väsymisvaurioparametrin arvo on yhdistetty liikennemääriin, joten testin avulla pystytään arvioimaan liikennemäärän avulla, kuinka hyvin bitumi kestää väsymisvaurioita. Malli ottaa huomioon myös, miten päällysteen rakenne vaikuttaa tuloksiin. Mallin tulokset lasketaan yleensä 2,5 ja 5 prosentin venymille, joiden on arvioitu kuvaavan ”kestävää” eli hyvin kantavaa ($\gamma_{max} = 2,5\%$ → päällystekerros yli 10 cm) ja ”heikkoa” ($\gamma_{max} = 5\%$ → päällystekerros alle 10 cm) päällystettä. (Bahia ym. 2013).

Taulukko 5. LAS-testin mittaustiedot.

Testin vaihe	Lämpötila (°C)	Mittausgeometria	Taajuus (Hz)	Muodonmuutoksen amplitudi (%)	Mitatavat parametrit
Taajuuspyyhkäisy	10	PP 8	0,1-30	0,1	N_f
Muodonmuutospyyhkäisy	10	PP 8	10	0,1-30	

MSCR-testillä (Multiple Stress Creep Recovery) pyritään kuvaamaan bitumin deformaatiokestävyyttä. Tutkimuksessa käytetty testi perustui AASHTO TP 70-11 standardiluonnokseen pienin muutoksin. Mittauslämpötilaksi valittiin 50 °C kuvaamaan päällysteen mahdollisia maksimilämpötiloja Suomessa. Koska mittauslämpötila oli niin korkea, käytettiin mittausgeometriaa PP 25. Testi koostui toistuvista näytteeseen kohdistuvista kuormitus- ja kuormituksen palautussykleistä erisuuruksilla kuormituksilla. Testissä bituminäytettä kuormitettiin yhden sekunnin ajan, minkä jälkeen näytteen annettiin palautua 9 sekuntia. Näytettä kuormitettiin jännityksillä 0,1, 3,2 ja 6,4 kPa ja kuormitus sekä kuormituksen palautus toistettiin kullakin jännityksellä kymmenen kertaa. Mittauksen tuloksena voitiin laskea parametrit J_{nr} (palautumaton virumismyötääminen), joka kuvaa kuormituksessa palautumattoman muodonmuutoksen määrää, sekä R (suhteellinen palautuma), joka kertoo vastaavasti palautuvan osuuden suuruuden. Testin havainnekuva sekä parametrien määritelmät on esitetty kuvassa 35 ja taulukossa 6. Taulukossa on määritelty myös eri jännityksillä mitattujen parametrien väliset erotusarvot $J_{nr,diff}$ ja R_{diff} , jotka kuvaavat bitumin virumiskäyttäytymisen muuttumista erilaisilla jännityksillä. Pienet erotusarvot ovat toivottuja, koska tällöin jännityksen suuruus ei vaikuta tuloksiin (pieni jännitysherkkyys), jolloin materiaalikäyttäytyminen on lineaarista.



Kuva 35. MSCR-testin kulku. (Muokattu lähteestä Soenen ym. 2013)

Taulukko 6. MSCR-testissä lasketut parametrit. (Muokattu lähteestä Soenen ym. 2013)

Parametri	Kuvaus	Kaava
R₁₀₀, %	Keskimääräinen palautumapro-sentti kuormitusjännityksellä 0,1 kPa.	$R_{100} \% = \frac{1}{10} \left(\sum_{n=1}^{10} \frac{B_n}{A_n} \right) * 100$
R₃₂₀₀, %	Keskimääräinen palautumapro-sentti kuormitusjännityksellä 3,2 kPa.	$R_{3200} \% = \frac{1}{10} \left(\sum_{n=1}^{10} \frac{B_n}{A_n} \right) * 100$
R₆₄₀₀, %	Keskimääräinen palautumapro-sentti kuormitusjännityksellä 6,4 kPa.	$R_{6400} \% = \frac{1}{10} \left(\sum_{n=1}^{10} \frac{B_n}{A_n} \right) * 100$
J_{nr, 100}, 1/kPa	Keskimääräinen kymmenen syklin palautumattoman muo-donmuutoksen suuruus kuor-mitusjännityksellä 0,1 kPa.	$J_{nr,100} = \frac{1}{10} \left(\sum_{n=1}^{10} \frac{C_n}{100 Pa} \right)$
J_{nr, 3200}, 1/kPa	Keskimääräinen kymmenen syklin palautumattoman muo-donmuutoksen suuruus kuor-mitusjännityksellä 3,2 kPa.	$J_{nr,3200} = \frac{1}{10} \left(\sum_{n=1}^{10} \frac{C_n}{3200 Pa} \right)$
J_{nr, 6400}, 1/kPa	Keskimääräinen kymmenen syklin palautumattoman muo-donmuutoksen suuruus kuor-mitusjännityksellä 6,4 kPa.	$J_{nr,6400} = \frac{1}{10} \left(\sum_{n=1}^{10} \frac{C_n}{6400 Pa} \right)$
R_{diff(3200-100)}	Palautuman erotusarvo jänni-tysten 3,2 kPa ja 0,1 kPa välillä	$R_{diff(3200-100)} = \frac{R_{100} - R_{3200}}{R_{100}}$
R_{diff(6400-3200)}	Palautuman erotusarvo jänni-tysten 6,4 kPa ja 3,2 kPa välillä	$R_{diff(6400-3200)} = \frac{R_{3200} - R_{6400}}{R_{3200}}$
R_{diff(6400-100)}	Palautuman erotusarvo jänni-tysten 6,4 kPa ja 0,1 kPa välillä	$R_{diff(6400-100)} = \frac{R_{100} - R_{6400}}{R_{100}}$
J_{nr, diff(3200-100)}	Palautumattoman myötäämisen erotusarvo jännitysten 3,2 kPa ja 0,1 kPa välillä	$J_{nr,diff(3200-100)} = \frac{J_{nr,100} - J_{nr,3200}}{J_{nr,100}}$
J_{nr, diff(6400-3200)}	Palautumattoman myötäämisen erotusarvo jännitysten 6,4 kPa ja 3,2 kPa välillä	$J_{nr,diff(6400-3200)} = \frac{J_{nr,3200} - J_{nr,6400}}{J_{nr,3200}}$
J_{nr, diff(6400-100)}	Palautumattoman myötäämisen erotusarvo jännitysten 6,4 kPa ja 0,1 kPa välillä	$J_{nr,diff(6400-100)} = \frac{J_{nr,100} - J_{nr,6400}}{J_{nr,100}}$

Reometrilla tehdyt erilaiset mittausohjelmat tehtiin Rheoplus-ohjelmalla (versio 3.2x). Rheoplus-ohjelmasta mittaustulokset siirrettiin Excel-tiedostoihin, joiden avulla suuri osa tuloksista on esitetty. Taajuuspyyhkäisyssä saadut tulokset siirrettiin vielä lisäksi IRIS-ohjelmaan (Interactive Rheology Information Systems, versio 2013), joka on reo-logisten mittaustulosten analysointityökalu. IRIS-ohjelmalla muutettiin taajuuspyyh-käisymittauksista saadut tulokset Master-käyriksi, joiden avulla myös relaksaatiomo-duulit voitiin rakentaa.

4 Tutkimustulokset ja niiden tarkastelu

4.1 Perinteiset mittaukset

Taulukkoon 7 on kerätty kaikkien tutkimuksessa käytettyjen bituminäytteiden perinteisten testien tulokset. Taulukossa on ilmoitettu myös poranäytepalojen tyhjätilat, täyttöasteet sekä sideainepitoisuudet. Näytteiden koodit on selitetty kuvissa 26 ja 27.

Taulukko 7. Porapalanäytteiden ja niistä uutettujen bituminäytteiden sekä referenssibitumien perinteiset mittaustulokset.

Näyte	Tyhjätila, V (SSD)	Täyttöaste, VFB	Sideainepitoisuus	Tunkeuma (25 °C)	Fraassimurtumispiste	Huomioita
	til.-%	til.-%	%	1/10 mm	°C	
1AA	1,1*	93*	6,0*	135	-21	Näytteessä selvästi liuotinta
1AC	1,0	93	6,2	38	-11	
1BA	4,1*	76*	5,8*	25	-9	
1BC	4	77	5,7	26	-12	
1R	-	-	5,9	22	-	
1FA	4,3*	75*	5,9*	33	-17	Näytteessä pieni määrä liuotinta
1FB	3,4**	81**	6,2**	35	-18	
1FC	4,2	77	6,0	40	-18	
1GA	1,7*	89*	6,1*	32	-12	
1GC	2,2	87	5,9	41	-18	Näytteessä pieni määrä liuotinta
2AA	1,4*	92*	6,2*	39	-14	Näytteessä selvästi liuotinta
2AC	1,5	91	6,2	22	-11	
2BA	1,4*	92*	6,4*	21	-9	
2BC	1,0	94	6,2	24	-10	
2CA	3,3*	81*	6,0*	17	-7	Huono alue
2CC	3,1	82	5,9	18	-5	
2DA	1,6*	91*	6,2*	23	-13	
2DB	2,1**	88**	6,2**	21	-12	
2DC	1,4	91	6,1	25	-13	Huono alue
2R	-	-	5,4	16	-	
2FA	1,1*	93*	6,0*	28	-15	
2FC	1,3	92	5,9	27	-15	
2GA	0,7*	96*	6,3*	28	-12	
2GC	0,9	94	6,1	28	-11	
3AA	1,2*	92*	6,5*	52	-14	Näytteessä selvästi liuotinta
3AC	1,0	94	6,6	32	-12	
3BA	0,3*	98*	6,7*	35	-14	
3BC	0,2	99	6,8	35	-15	
3R	-	-	5,9	25	-	

Näyte	Tyhjätila (SSD)	Täytöstöaste VFB	Sideainepitoisuus	Tunkeuma (25 °C)	Fraassimurtumispiste	Huomioita
	til.-%	til.-%	%	1/10 mm	°C	
3FA	1,1*	93*	6,4*	35	-17	
3FC	1,0	94	6,5	40	-14	
3GA	1,2*	93*	6,8*	31	-17	
3GC	1,2	93	6,7	33	-14	
4AA	0,6*	95*	6,3*	68	-14	Näytteessä selvästi liuotinta
4AC	1,1	91	5,9	30	-11	
4BA	0,6*	96*	6,3*	32	-12	
4BC	0,6	96	6,4	33	-12	
4R	-	-	5,1	25	-	
4FA	2,3*	86*	6,0*	27	-14	
4FC	2,6	84	5,9	28	-15	
4GA	3,1*	80*	6,0*	28	-12	
4GC	3,1	81	5,8	29	-12	
70/100	-		-	76	-	Lisämässan bitumi
70/100-RTFOT	-		-	47	-	Lisämässan bitumin RTFOT-vanhennus
650/900	-		-	297***	-	Elvytin

*Kolmen porapalan tuloksen keskiarvo.

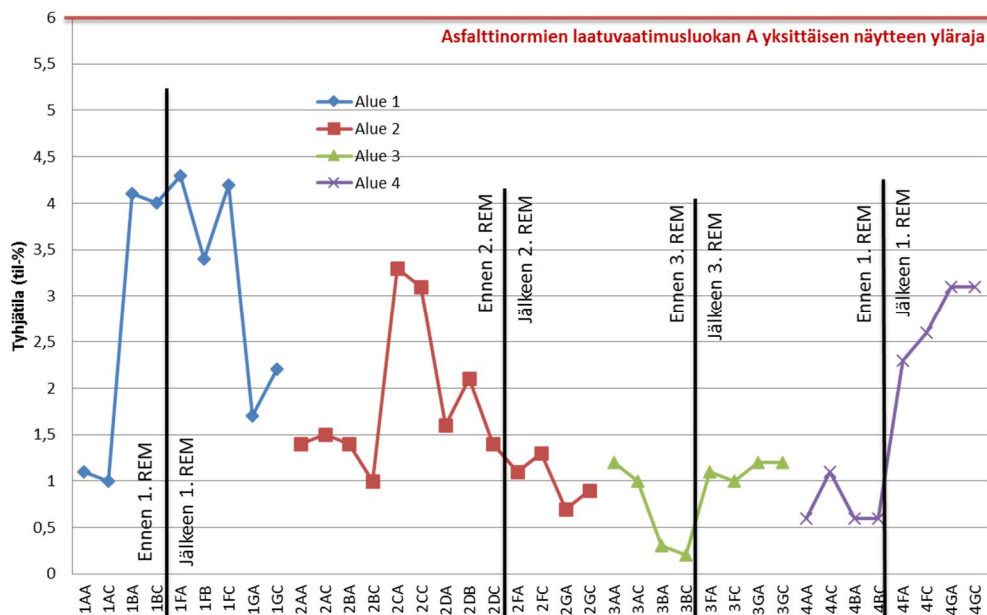
**Kahden porapalan tuloksen keskiarvo

***Tunkeuma mitattu lämpötilassa 15 °C

Referenssibitumien 70/100 ja 70/100-RTFOT pehmenemispisteet olivat 48,4 ja 53,2 °C sekä elvyttimen 25,6 °C.

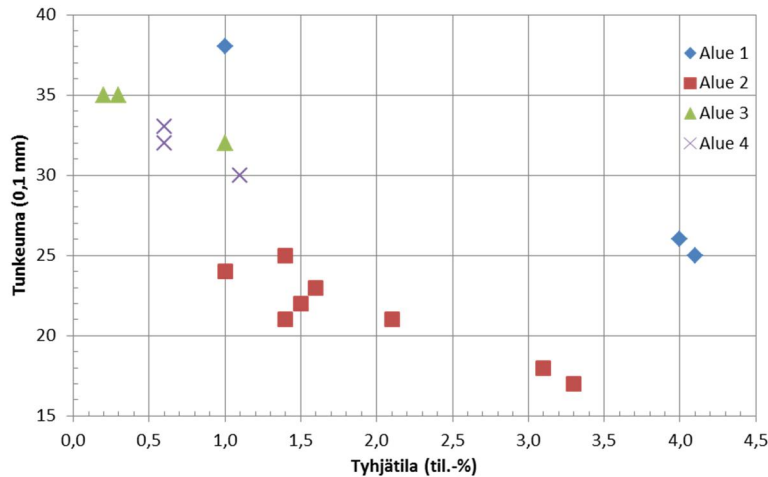
Taulukosta voidaan tunkeuma-arvoja vertaamalla havaita nopeasti, että näytteet 1AA, 2AA, 3AA ja 4AA poikkesivat huomattavasti muista tuloksista selvästi suuremmilla arvoilla. Tämä johtuu siitä, että uuttosuodatuksen jälkeen tehtävässä haihdutuksessa osa liuottimena käytettävästä metyleenikloridista oli jäänyt näytteisiin eli haihdutus ei onnistunut täydellisesti. Bituminäytteeseen jäänyt nestemäinen metyleenikloridi pehmensi näytettä, jolloin mitatut tunkeuma-arvot olivat liian suuria. Haihdutuksessa mahdollisesti jääneen liuottimen esiintyminen näytteissä voidaan todentaa FTIR-menetelmällä, joka myös tehtiin kaikille tutkimuksen näytteille. Näiden mittausten avulla havaittiin, että myös näytteisiin 1FC sekä 1GC oli jäänyt pieni määrä liuotinta, joka voidaan havaita tunkeumien pienenä nousuna verrattuna muihin samasta kohdasta otettuihin näytteisiin.

Asfalttinäytteiden tyhjätilat määritettiin Asfalttinormien mukaisesti SSD-menetelmällä mitatun asfalttinäytteen kappaleitiheyden avulla, mitä käytetään SMA-näytteillä. Poranäytteiden tyhjätilat on esitetty myös kuvassa 36 alueittain. Kuvaan on lisätty myös Asfalttinormien esittämät sallitut yksittäisen näytteen tyhjätilat kivimastiksiasfaltille (SMA) vaatimusluokassa A. Yleisesti tutkimuksen näytteiden tyhjätilat olivat varsin pieniä eikä yksikään asfalttinäytteistä ylittänyt yksittäisen näytteen sallittua rajaa.



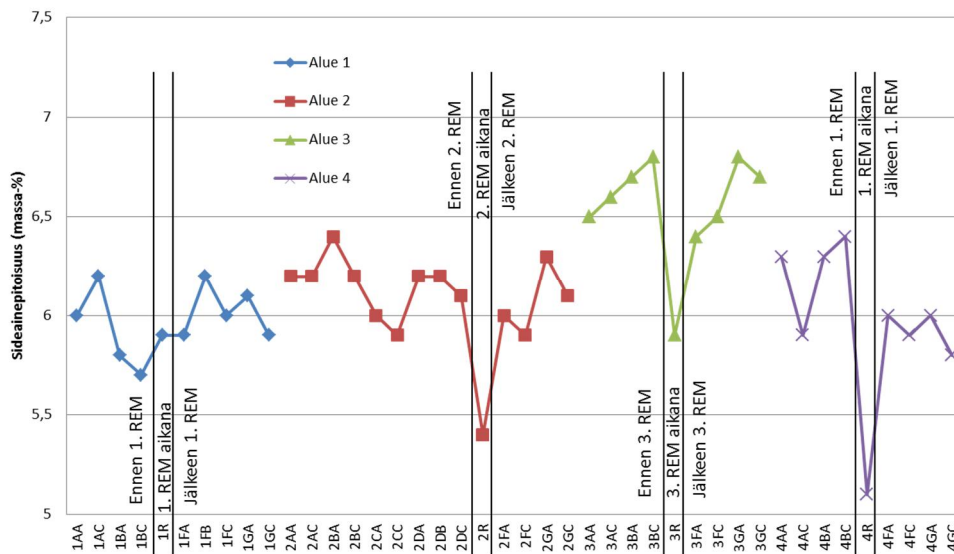
Kuva 36. Poranäytteiden tyhjätilat.

Poranäytteiden tyhjätiloilla voidaan osittain selittää eroavaisuuksia myös bitumimittaus-tuloksissa. Alueella 1 tyhjätilat vaihtelivat eri kohtien välillä eikä Rem-toimenpiteen vaikutusta pystytty arvioimaan tulosten perusteella. Tuloksista voitiin kuitenkin huoma-ta tyhjätilan vaikutus päällysteen sideaineen vanhenemiseen käyttöaikana, mikä on esi-tetty myös kuvassa 37. Näytteiden 1BA ja 1BC suuremmat tyhjätilat altistivat bitumin voimakkaammalle vanhenemiselle kuin samalta alueelta ja vaiheesta oleva poranäyte 1AC, jossa tyhjätila oli pienempi. Tämä näkyy taulukossa eroina tunkeuma-arvoissa siten, että näytteen 1AC tunkeuma oli vanhenemisen takia laskenut huomattavasti vä-hemmän kuin näytteiden 1BA ja 1BC. Tyhjätilan noin kolmen prosenttiyksikön nousu laski bitumin tunkeumaa arvosta 38 arvoon 26. Sama vaikutus voitiin todeta myös alu-eella kaksi, jossa näytteillä 2CA ja 2CC oli muita alueen näytteitä suuremmat tyhjätilat sekä pienemmät tunkeuma-arvot. Kuvassa 37 ennen Rem-toimenpidettä otettujen näyt-teiden tunkeumat on esitetty tyhjätilan funktiona alueittain. Kuvasta nähdään selvästi, että tiellä vanhentuneen näytteen tunkeuma riippuu päällysteen tyhjätilasta. Tuloksia on järkevämpi verrata alueittain, koska jokaisella alueella oli erilainen tunkeuman lähtöta-so. Näytteitä 2CA ja 2CC lukuun ottamatta alueen 2 tyhjätilat olivat pieniä eikä Rem-toimenpide tuonut muutosta asiaan. Alueella 3 tyhjätilat olivat erittäin alhaisia eikä muutosta Rem-toimenpiteen yhteydessä myöskään tapahtunut. Alueella 4 tyhjätilat nou-sivat Rem-toimenpiteen jälkeen erittäin alhaisista tyhjätiloista 1-2 prosenttiyksikköä.



Kuva 37. Ennen Rem-toimenpidettä otettujen näytteiden tunkeumat tyhjätilan funktiona

Pora- sekä rouhenäytteiden sideainepitoisuuden vaihtelut on esitetty kuvassa 38. Yleisesti näytteiden sideainepitoisuudet olivat melko normaaleja eli kuuden prosentin molemmilla puolilla. Alueen 3 poranäytteillä sideainepitoisuudet olivat muiden alueiden näytteitä korkeampia (6,5-7 %). Sideainepitoisuuksissa ei tapahdu merkittäviä muutoksia millään alueella Rem-toimenpiteen yhteydessä. Alueiden 2, 3 ja 4 Rem-toimenpiteen yhteydessä otettujen asfalttirouhenäytteiden (2R, 3R ja 4R) sideainepitoisuudet olivat poranäytepalloja pienempiä.

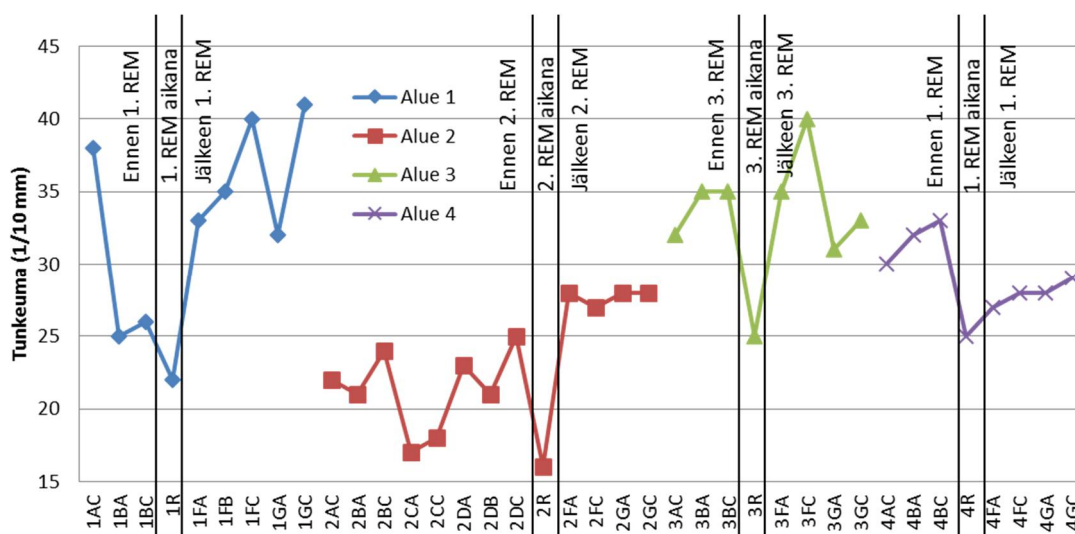


Kuva 38. Asfalttimassanäytteiden sideainepitoisuudet.

Tutkimuksen kohteilla alkuperäisen asfalttimassan sideaineena oletettiin olevan 70/100-bitumia. Koska sideaineena olevan bitumin oletetaan vanhenevan eli kovettuvan asfalttimassan valmistuksessa sekä levitysvaiheessa noin yhden bitumiluokan verran (tässä tapauksessa bitumiluokkaan 50/70), voidaan olettaa, että valmiin uuden asfalttipäällysteen bitumin tunkeuma on ollut välillä 50...70. Kuten jo tiedetään, asfalttipäällysteen sideaine jatkaa vanhenemista koko päällysteen käyttöiän aikana, mikä ilmenee bitumin tunkeuman laskuna. Rem-toimenpiteessä vanhaan asfalttimassaan lisätään tuoretta asfalttimassaa sekä elvytintä. Elvyttimen tehtävä on sekoittaa vanhentuneen bitumin kanssa ja tehdä koko uuden asfalttimassan sideaineesta pehmeämpää ja helpommin työstettävää. Tavoitteena elvyttimen ja tuoreen asfalttimassan lisäämisellä Rem-toimenpiteessä on palauttaa asfalttipäällyste ja sen sideaine mahdollisimman lähelle alkuperäisiä ominaisuuksia.

Pora- ja rouhenäytteistä uutettujen sideainebitumien tunkeumat on esitetty kuvassa 39. Kuvasta on jätetty pois huomattavasti liuotinta sisältävät näytteet 1AA, 2AA, 3AA ja 4AA, koska ne vääristivät tulosten tulkintaa. Kaikki tieltä tutkittujen bituminäytteiden tunkeumat olivat välillä 16...41 eli bitumin vanheneminen oli jatkunut päällysteessä sen käyttöaikana. Millään alueella elvyttäminen ei pystynyt palauttamaan bitumin tunkeumaa tuoreen bitumin 70/100 veroiseksi eikä edes RTFOT-vanhennetun näytteen veroiseksi (tunkeuma noin 50...70), mitä voidaan pitää realistisena tavoitteena. Bituminäytteiden tunkeumat vaihtelevat sekä alueittain että alueen sisällä, mutta myös Rem-toimenpiteen eri vaiheissa.

Ennen Rem-toimenpidettä otetuilta näytteiltä voitiin havaita, että alueella 2 oli yleisesti kaikkein pienimmät tunkeumat. Kuten kuvasta nähdään, Rem-toimenpidekertojen määrä ei välttämättä ole ratkaisevinta tunkeumien osalta, koska esimerkiksi alueen 3 tunkeumat olivat korkeampia kuin alueen 2, vaikka alueella 3 Rem-toimenpide tehtiin jo kolmannen kerran. Kaikilla alueilla Rem-toimenpiteen aikana otetuilla näytteillä (näytteet *R) oli oman alueensa pienin tunkeuma. Tämä on loogista, koska Rem-toimenpiteen alussa päällystettä lämmitetään ja kuumajyrsitään, jolloin bitumi altistuu korkean lämpötilan sekä vapaamman hapen pääsyn takia voimakkaammalle hapettumiselle. Nämä näytteet otettiin juuri ennen elvyttimen ja tuoreen asfalttimassan lisäystä. Lisämassan ja elvyttimen lisäyksen vaikutukset vaihtelivat eri alueiden kesken. Alueella 2 näytteiden tunkeumat kasvoivat alkuperäisestä ennen Rem-toimenpidettä eli lisämassan ja elvyttimen lisäyksellä onnistuttiin nostamaan tunkeumia. Alueella 3 tunkeumat palautuivat ennen toimenpidettä olleiksi, mutta alueella 4 jäätin alkuperäistä alempiin tunkeuma-arvoihin. Alueen 1 Rem-toimenpiteen vaikutuksen arvioiminen oli vaikeampaa, koska ennen Rem-toimenpidettä otetut näytteet poikkesivat toisistaan niin merkittävästi. Jos yleinen lähtötilanne oli lähempänä näytteen 1AC tunkeumia, oli käyttäytyminen alueen 3 kaltaista eli tunkeumat säilyivät samoina. Jos taas lähtötilanne oli lähempänä näytteitä 1BA ja 1BC, tunkeuma-arvoja saatiin nostettua elvytyksen ansiosta. Tunkeuma-arvojen vaihtelut alueiden sisällä ennen Rem-toimenpidettä olivat selitettävissä päällysteen erisuuruksilla tyhjätiloilla, kuten jo aikaisemmin käytiin läpi.



Kuva 39. Pora- ja rouhenäytteistä uutettujen bitumien tunkeumat.

Rem-toimenpiteessä vanhaan asfalttimassaan lisättiin tuoretta asfalttimassaa, jonka sideaineena käytettiin samaa 70/100-bitumia. Lisämassan osuus riippui siitä, kuinka pal-

jon tie oli kulunut ja sitä kautta kuinka paljon uutta massaa tarvittiin ja sitä mahtui. Normaalisti lisämässan määrät ovat noin 15...25 kg/m² eli 15...25 % koko asfalttimassasta. Tämän tutkimuksen Rem-töissä toteutunut keskimääräinen lisämässan määrä oli 24,88 kg/m², mutta määrät saattoivat vaihdella merkittävästikin eri kohtien ja alueiden välillä esimerkiksi epätasaisen urautumisen takia. Toimenpiteen yhteydessä vanhaan asfalttimassaan lisättiin myös elvytintä, joka on Suomessa määrätty olevan pehmeää tiebitumia 650/900. Tällä hetkellä Rem-toimenpiteen yhteydessä Suomessa käytettävän elvytinmäärän ohjearvo on 250 g/m². Tutkimuksen Rem-töiden yhteydessä kaikilla alueilla havaittiin sideaineen pintaannousua, joten elvytinmääriä piti alentaa. Pintaannousu johtui todennäköisesti asfalttimassan erittäin korkeasta täyttöasteesta, mikä voidaan havaita taulukosta 7. Koekohteilla tyhjälilat jäivät yleisesti alle 2 %, jolloin bitumin täyttöaste kiviaineksen tyhjätilassa kasvoivat paikoin lähes 100 %:iin asti, jolloin ylimääräinen bitumi nousi päällysteen pintaan. Taulukkoon 8 on kerätty kunkin alueen keskimääräiset elvytinmäärät sekä lisämässamäärät niistä alueista, joista tiedot olivat saatavilla. Taulukon arvot olivat päiväkeskiarvoja.

Taulukko 8. Keskimääräiset elvytin- ja lisämässamäärät.

	Elvytin [kg/m ²]	Lisämässä [kg/m ²]
Alue 1	0,19	-
Alue 2	0,15	23,85
Alue 3	0,15	24,51
Alue 4	0,08	-
Kaikki	0,13	24,88

Taulukkoon 9 on laskettu kaavaa 22 käyttäen, miten elvytin ja lisämässan bitumi laskennallisesti muuttavat vanhentuneen bitumin tunkeumaa, jos sekoittuminen tapahtuu täydellisesti. Tulokset on laskettu sekä teoreettiselle tilanteelle, jossa elvyttimen määrä on ohjearvon (250 g/m²) mukainen sekä taulukossa 8 olevien elvytinmäärien mukaan. Laskennassa tutkittiin vain elvytinmäärän vaikutusta tuloksiin, joten muut arvot pidettiin vakioina. Lisämässan määräksi valittiin päällysteurakassa käytetty ohjearvo 25 kg/m², johon myös keskiarvollisesti päästiin. Koska koko asfalttimassan määrä päällysteessä oli 100 kg/m², valittiin vanhan massan määräksi 75 kg/m². Sideainepitoisuutena käytettiin 6 prosenttia, jonka perusteella asfalttimassojen bitumimäärät saatiin laskettua. Vanhentuneen bitumin tunkeuma-arvoina (Pen RAP) käytettiin Rem-toimenpiteen aikana otetun näytteen tunkeumaa. Lisämässan bitumin tunkeumana (Pen 70/100-RTFOT) käytettiin referenssibitumin RTFOT-vanhennettua tulosta, koska massojen sekoitusvaiheessa lisämässan bitumi on todennäköisesti ehtinyt jo vanhentua sen verran lisämässan valmistuksessa. Taulukossa ei ole huomioitu elvyttimen vanhenemista. Taulukossa on laskettu sekä pelkän elvyttimen että elvyttimen ja lisämässan bitumin vaikutukset tunkeumiin.

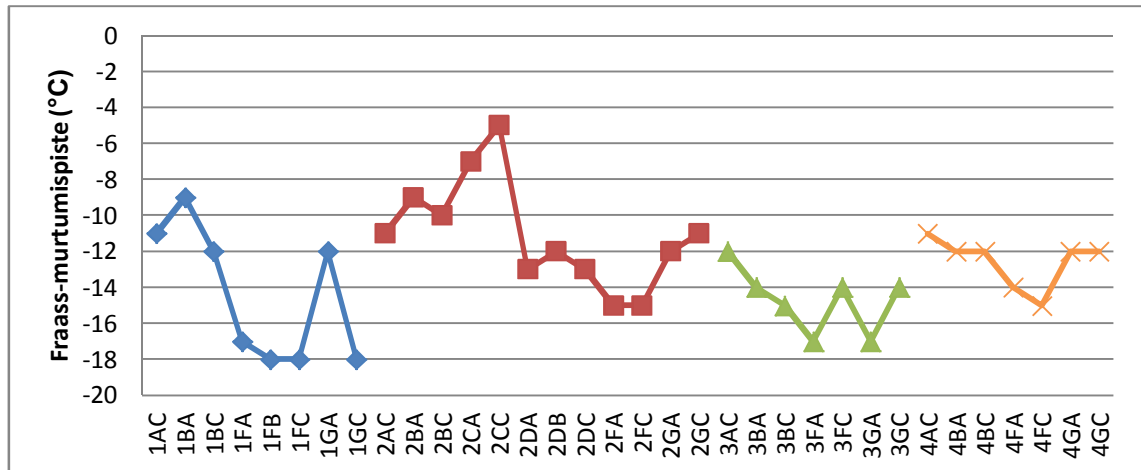
Taulukosta voidaan havaita, ettei nykyisin vaadittavilla elvytinmäärillä ole edes teoreettisesti mahdollista saavuttaa RTFOT-vanhennettun 70/100-bitumin tunkeumaa, jos bitumi on vanhentunut jo niin paljon kuin kaikki näytteet olivat. Pelkällä elvyttimellä voidaan ohjearvoa käyttämällä nostaa vanhentuneen bitumin tunkeumaa 4...5 yksikköä, mutta koska tutkimuksen elvytinmäärät olivat pienempiä, oli myös elvytyksen vaikutus pienempi (2...3 yksikön nousu). Ohjearvoja käyttämällä vanhentuneen bitumin tunkeumaa voidaan kokonaisuudessaan nostaa 8 yksikköä, mikä oli melko riippumaton alkuperäisestä bitumin tunkeumasta kyseisellä vaihteluvälillä. Käyttämällä alueiden keskiarvollisia elvytinmääriä voitiin bitumin tunkeumaa nostaa 6...8 yksikköä.

Taulukko 9. Laskennallisesti määritetty elvyttimen ja lisämässän bitumin vaikutus vanhentuneen bitumin tunkeumaan.

Alue	Elvytin (kg/m ²)	Pen RAP	Pen 70/100- RTFOT	Pen 650/900	Pen RAP+ 650/900	Pen RAP+650/900+ 70/100 RTFOT
Alue 1 (teor.)	0,25	22	47	800	27	30
Alue 1 (keskim.)	0,19	22	47	800	25	30
Alue 2 (teor.)	0,25	16	47	800	20	24
Alue 2 (keskim.)	0,15	16	47	800	18	23
Alue 3 (teor.)	0,25	25	47	800	30	33
Alue 3 (keskim.)	0,15	25	47	800	28	32
Alue 4 (teor.)	0,25	25	47	800	30	33
Alue 4 (keskim.)	0,08	25	47	800	27	31

Vertaamalla taulukon 9 uusia tunkeumia kuvassa 39 ja taulukossa 7 oleviin Rem-toimenpiteen jälkeen otettujen näytteiden mitattuihin tunkeumiin, voidaan tutkia tulosten vastaavuutta, oikeellisuutta sekä edustavuutta. Alueella 1 ja 2 lasketut tunkeumat ovat pienempiä kuin mitatut sekä teoreettisella että keskimääräisellä elvytinmäärällä laskettuina. Tämä voi johtua siitä, että vanhan bitumin tunkeumat eivät keskimäärin ole niin pieniä kuin näytteiden 1R ja 2R tunkeumat ovat. Alueen 3 lasketut ja mitatut arvot ovat melko lähellä toisiaan. Alueen 4 lasketut tunkeumat taas ovat suurempia kuin näytteiden mitatut tunkeumat. Tämä saattaa tarkoittaa vastaavasti, että vanhan bitumin tunkeumat eivät keskimäärin ole niin suuria kuin näytteen 4R. Se voi myös tarkoittaa, että näytekohtien elvytinmäärät ovat vieläkin pienempiä tai lisämässän määrä on pienempi. Kaikkiaan voidaan sanoa, että on useita eri asioita, jotka saattavat vaikuttaa bitumin tunkeuman muutokseen Rem-toimenpiteen yhteydessä, mikä vaikeuttaa huomattavasti bitumin tunkeuman tarkkaa laskemista.

Poranäytteistä uutettujen bituminäytteiden Fraass-murtumispisteet on esitetty alueittain kuvassa 39. Alueilla 1 ja 2 Rem-toimenpide alensi Fraassin murtumislämpötilaa eli kylmäominaisuudet paranivat. Vastaavasti alueilla 3 ja 4 lämpötilat pysyivät joko samoissa suuruuksissa tai myös alenivat Rem-toimenpiteen vaikutuksesta.



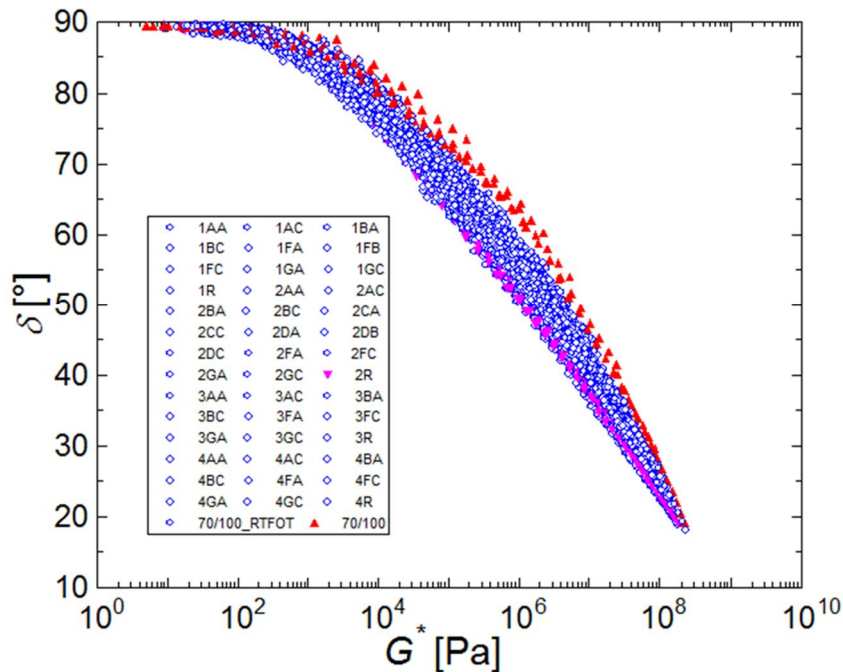
Kuva 40. Poranäytteistä uutettujen bitumien Fraass-murtumispisteet.

4.2 Reologiset parametrit lineaarisella alueella taajuuspyyhkäisyssä

Tutkimuksen reologiset mittaukset tehtiin dynaamisella leikkausreometrillä Aalto-yliopiston Tielaboratoriossa. Suurin osa reologisesta tutkimuksesta painottui bitumin käyttäytymiseen lineaarisella viskoelastisella alueella (LVE-alue), joten mittaukset tehtiin taajuuspyyhkäisytestillä useilla eri lämpötiloilla välillä 0...90 °C. Oskilloivien reologisten mittausten perusteet on esitetty luvussa 2.2.3.

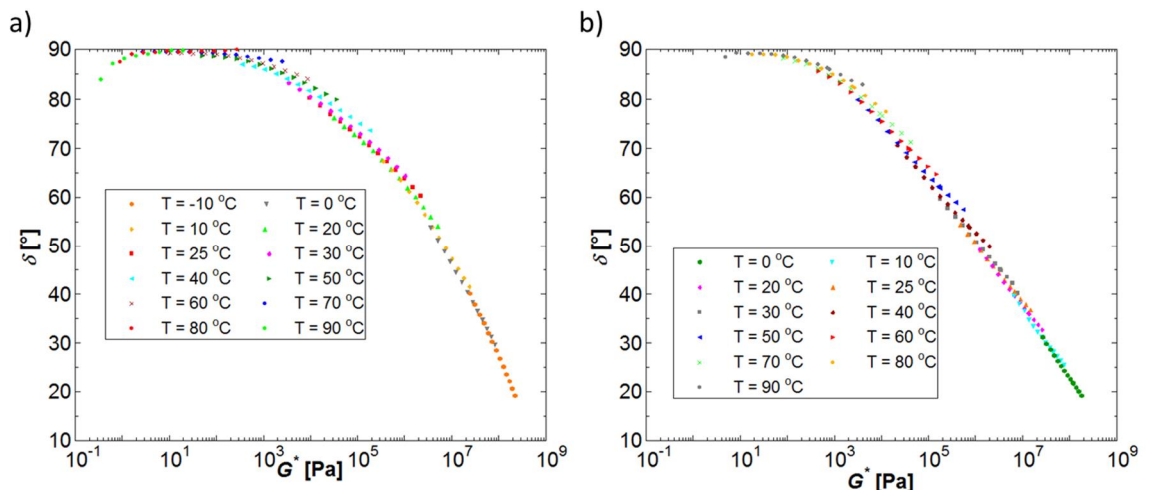
Taajuuspyyhkäisyssä bitumin ominaisuuksia mitattiin taajuusvälillä 0,01...10 Hz (14 mittapistettä/lämpötila) lämpötiloissa 0...90 °C kymmenen asteen välein sekä lämpötilassa 25 °C. Reometri mittaa kussakin pisteessä kompleksimoduulin (G^*) ja vaihekulman (δ) arvot. Taajuuspyyhkäisyssä mittapisteiden määrä oli suuri (yli 150/näyte) ja koska tutkimuksen näytteitäkin oli lähes viisikymmentä, on kaikkien tulosten havainnollinen esittäminen hankalaa, eikä kaikkia yksittäisiä mittapisteitä ole järkevää esittää työssä. Liitteessä B on esitetty kaikkien näytteiden kompleksimoduulit ja vaihekulmat taajuudella 1,78 Hz kaikilla mitatuilla lämpötiloilla.

Black diagrammi (kts. 2.2.5) on yleinen tapa esittää taajuuspyyhkäisymittausten tuloksia, sillä kaikki mittauspisteet voidaan esittää yhdessä kuvaajassa. Black diagrammilla voidaan myös todentaa tulosten oikeellisuutta sekä bitumin termoreologista käyttäytymistä. Kuvassa 41 on esitetty kaikkien näytteiden Black diagrammit. Kuvassa on eroteltu värin ja symbolin mukaan tuore referenssibitumi (70/100) sekä näyte 2R, joka tunkeuman perusteella oli eniten vanhentunut näyte. Kaikki muut näytteet asettuvat ainakin suuremmaksi osaksi näiden kahden ääripään väliin.



Kuva 41. Tutkimuksen kaikkien bituminäytteiden Black diagrammit.

Kuvassa 42 on vielä esitetty näytteiden 70/100 ja 2R Black diagrammit eri lämpötiloissa. Molemmista näytteistä voidaan havaita, että eri lämpötilat asettuivat melko hyvin samalle, jatkuvalle käyrälle, eli kummatkin näytteet olivat termoreologisesti yksinkertaisia, joten aika-lämpötila-superpositioperiaatetta voitiin hyödyntää. Vastaavanlaisella tarkastelulla kaikkien näytteiden todettiin olevan termoreologisesti yksinkertaisia. Black diagrammien perusteella missään näytteistä ei yksittäisiä virheellisiä mittauspisteitä lukuun ottamatta havaittu olevan merkittäviä poikkeamia.

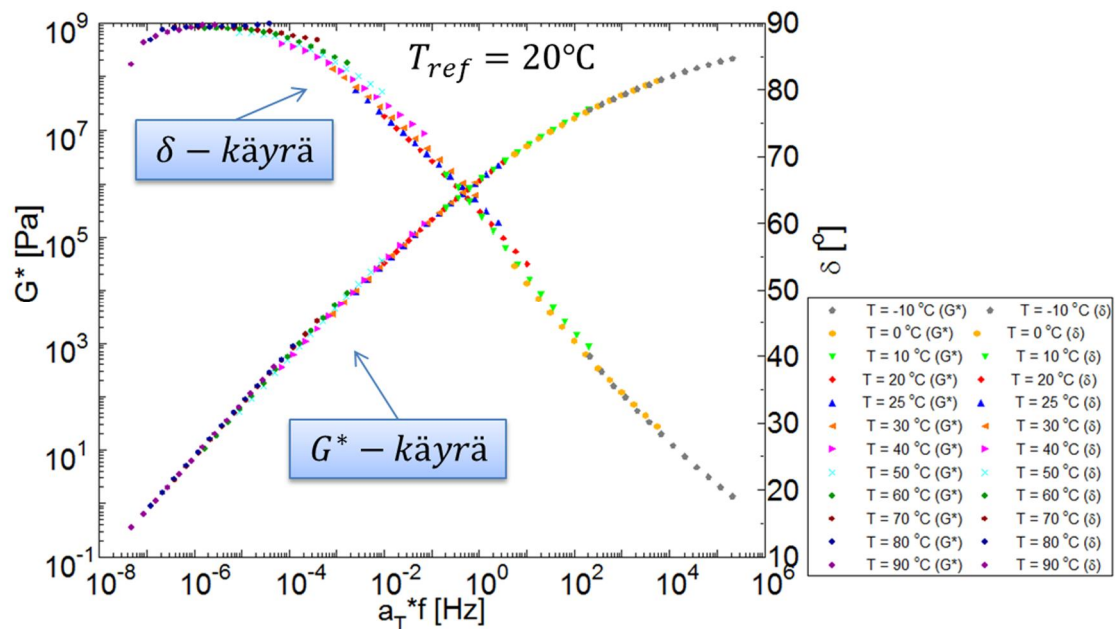


Kuva 42. Referenssibiumin (70/100) (a) ja näytteen 2R (b) Black diagrammit, joissa mittauslämpötilat on eroteltu toisistaan.

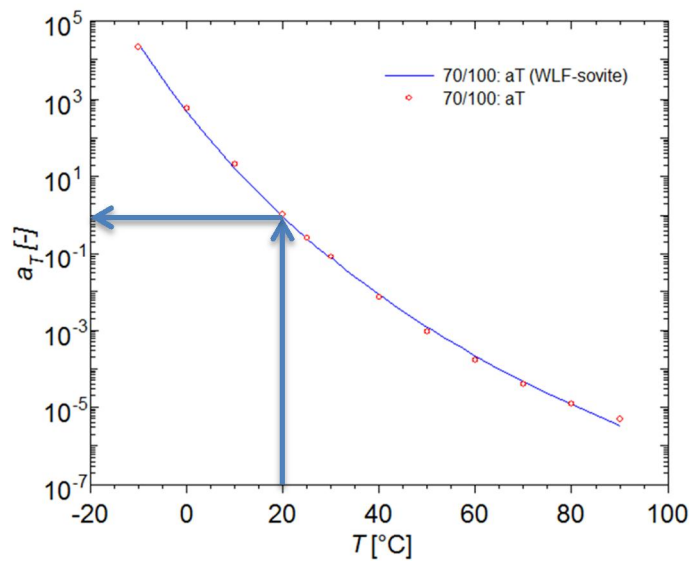
Koska kaikki näytteet todettiin termoreologisesti yksinkertaisiksi, voitiin kaikille näytteille taajuuspyyhkäisydatasta TTS-periaatetta käyttäen rakentaa Master-käyrät (kts. 2.2.4). Master-käyrät tehtiin IRIS Rheo-Hub -analyysiohjelmalla, jossa eri lämpötiloissa saadut taajuuspyyhkäisykäyrät yhdistettiin siirtokertoimen avulla vaakasuunnassa jatkuvaksi yhdeksi käyräksi. Master-käyrät tehtiin varasto- (G') ja häviömoduulin (G'')

avulla, mutta tulokset muutettiin myös kompleksimoduulille (G^*) ja vaihekulmalle (δ). Kaikkien näytteiden Master-käyrien referenssilämpötilaksi valittiin 20 °C.

Kuvassa 43 on esimerkki tuoreen referenssibitumin (70/100) Master-käyrän muodostamisesta kompleksimoduulille sekä vaihekulmalle. Eri lämpötiloissa mitatut pisteet asetuivat kompleksimoduulin tapauksessa erinomaisesti samalle käyrälle ja vaihekulman tapauksessakin hyvin. Lämpötilasta riippuvan vaakasiirron suuruus määritettiin siirtokertoimen a_T avulla. Kuvassa 44 on esitetty näytteen 70/100 Master-käyrien siirtokertoimet lämpötilan funktiona sekä WLF-yhtälön mukaan laskettu sovite. Sovite vastasi hyvin laskettujen siirtokertoimien arvoja. Liitteen C taulukossa ovat kaikkien näytteiden Master-käyrien siirtokertoimen WLF-yhtälössä käytetyt kertoimet C1 ja C2. Kuvan 43 käyrästä voidaan huomata, että korkeat lämpötilat vastaavat alhaisia taajuuksia, jolloin kompleksimoduuliarvot ovat pieniä ja vaihekulmat lähestyvät arvoa 90 °. Vastavasti kylmät lämpötilat kuvaavat suuria taajuuksia, jolloin kompleksimoduuliarvot ovat suuria ja vaihekulmat pieniä.



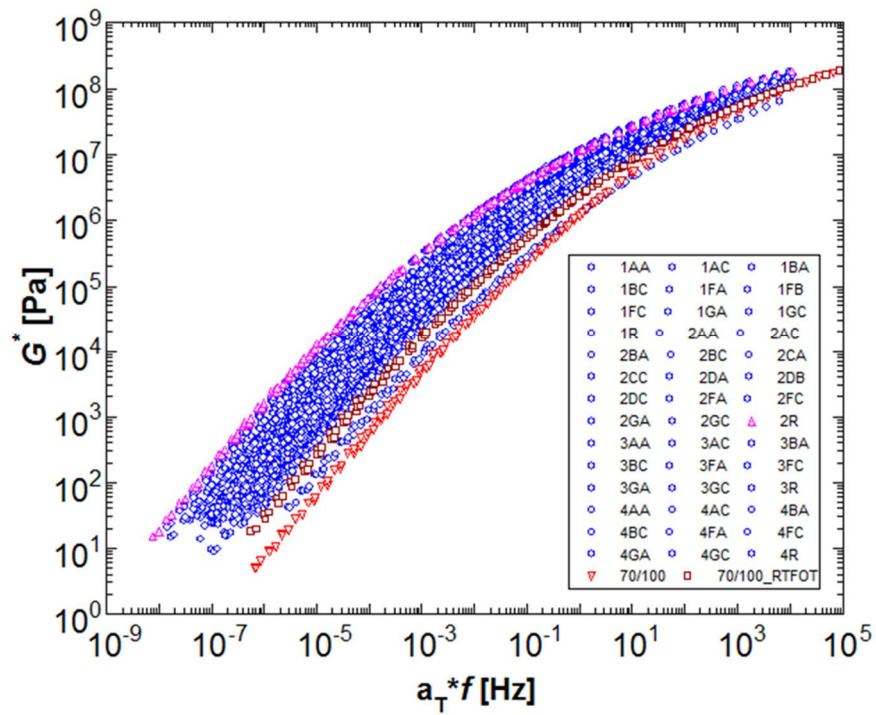
Kuva 43. Referenssibitumin 70/100 master-käyrät kompleksimoduulille ja vaihekulmalle, jossa mittauslämpötilat eroteltu toisistaan.



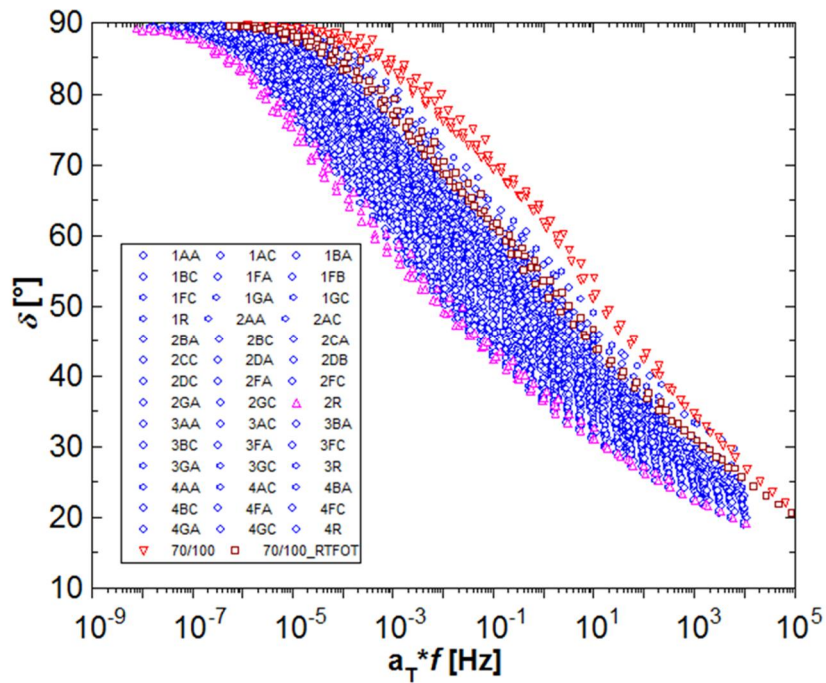
Kuva 44. Näytteen 70/100 siirtokertoimen arvo lämpötilan funktiona sekä WLF-sovite. Referenssilämpötilassa siirtokerroin a_T saa aritmeettisen arvon 1.

Kaikille tämän tutkimuksen näytteille tehtiin samanlaiset Master-käyrät kompleksimoduulille ja vaihekulmalle ja ne on esitetty kuvissa 45 ja 46. Näytteiden käyttäytyminen on oletettua. Alhaisilla taajuuksilla (eli korkeissa lämpötiloissa) kompleksimoduuli lähestyi bituminäytteen viskositeetista riippuvaa viskoosia asymptoottia, jonka kulmakerroin on noin 1/1. Vastaavasti suurilla taajuuksilla (eli kylmissä lämpötiloissa) moduuli-arvot alkavat kääntyä kohti samaa elastista asymptoottia.

Kuvista on taas eroteltu näytteet 70/100 ja 2R, mutta myös tuoreen bitumin RTFOT-vanhennettu näyte (70/100_RTFO). Kuvan 45 kuvaajasta voidaan havaita, että tunkeuman perusteella kaikkein jäykin näyte (2R) näyttäisi olevan kompleksimoduuli-arvojen perusteella kaikkein jäykin näyte ja toisaalta kuvan 46 perusteella samalla kaikkein elastisin (pienimmät vaihekulman arvot tietyllä taajuudella).



Kuva 45. Kaikkien tutkimuksen näytteiden kompleksimoduulin master-käyrät referenssilämpötilassa $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Kuva 46. Kaikkien tutkimuksen näytteiden vaihekulmien master-käyrät referenssilämpötilassa $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.3 Väsymis- ja deformaatiokestävyyden reologiset parametrit

Tutkimuksessa dynaamisella reometrilla tehtiin myös lineaarinen amplitudipyyhkäisy (LAS-testi) sekä dynaaminen virumatesti (MSCR-testi), joiden tulokset on esitetty alla. Testien kulut ja mitattavat parametrit on kuvattu kappaleessa 3.3.2.

Yhdysvalloissa tehdyssä tutkimuksessa (Bahia ym. 2013) LAS-testien tuloksien on huomattu korreloivan melko hyvin tieltä havaittujen väsymisvaurioiden kanssa. Myös liikennemäärien (mitattu standardiakselikuormien (ESAL) kuormituskertojen avulla) on havaittu korreloivan väsymisvaurioiden kanssa, joten eri kuormitusluokille on määritetty väsymiskestävyyttä kuvaavat vähimmäisrajat LAS-testin tulosten perusteella. Näitä laskettuja raja-arvoja on ehdotettu osaksi standardiluonnoksen AASHTO MP-19 mitoitusterusteita ja ne on listattu taulukkoon 10 (N_F -arvo). Parhaiten väsymisvaurioiden kanssa korreloivat LAS-testin tulokset saatiin, kun sideaineen mittaustilapöytä oli PG-luokituksen keskilämpötila. Samassa tutkimuksessa mittaustilapöydälle määritettiin bitumin jäykkyyden mukaan raja-arvot, joiden välillä mittaus pitäisi suorittaa, kun taajuus on 10 Hz. Raja-arvot on esitetty kuvassa 47.

Taulukko 10. Kuormitusluokat.

Kuormitusluokka	ESAL (10^6)	Liikenteen keskinopeus (km/h)	Lisähuomiot	N_F , kun $\gamma_{max}=2,5$ tai 5 %	$J_{nr, 3,2}$ (1/kPa)	$J_{nr, diff}$ (%)
Standard "S"	<10	>70		>15000	<4,0	<75
High "H"	10-30	20-70		>19000	<2,0	<75
Very High "V"	>30	<20		>31000	<1,0	<75
Extremely High "E"	>30	<20	Esim. satamat, tulli-alueet	>31000	<0,5	<75

Maksimi mittaustilapöytä

- $G^* > 10$ MPa, kun $f=10$ Hz
- Jos pehmeämpää → ei pysy välttämättä mittavälissä, jolloin geometriamuutoksia

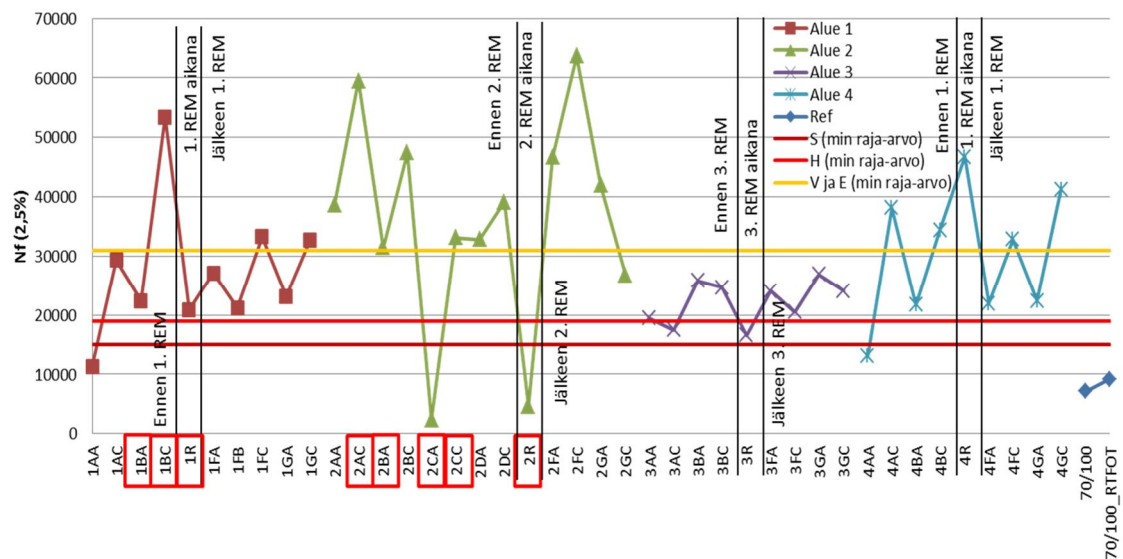
Minimi mittaustilapöytä

- $G^* < 60$ MPa, kun $f=10$ Hz
- Jos jäykempää → liian haurasta ja sideaineen ja mittalevyjen välinen tarttuvuus saattaa kärsiä

Kuva 47. Mittaustilapöytä koskevat raja-arvot.

Kaikkien näytteiden LAS-testin tulokset on esitetty liitteen D taulukossa. Osa LAS-testin tuloksista on esitetty myös kuvassa 48. Väsymisvaurioparametrin N_F -arvot laskettiin maksimivenymäärällä 2,5 %, jonka on arvioitu kuvaavan kestävä yllä 10 cm paksuista päällystettyä. Kuvaan on lisätty myös taulukossa 10 olevien kuormitusluokkien raja-arvot. Tuoreen ja RTFOT-vanhennetun referenssibitumin arvot olivat selvästi kaikkia kuormitusluokkien raja-arvoja heikompia, mutta koska testi on tarkoitettu vain vanhentuneille bitumeille, voidaan niiden tulokset jättää huomiotta. Myös näytteet 1AA ja 4AA jäivät S-luokan raja-arvojen alle, mutta tämä saattaa johtua näytteisiin jääneen liuottimen vaikutuksesta. Punaisella laatikolla merkittyjen näytteiden kompleksimodu-

liarvot ylittivät mittausoloissa ($T = 10\text{ °C}$, $f = 10\text{ Hz}$) kuvassa 47 arvioitujen maksimi-jäykkyyden rajan eli 60 MPa. Näiden näytteiden osalta mittauslämpötila saattoi olla liian alhainen, jolloin myös mittausvirheet olivat mahdollisia. Ainakin näytteiden 2CA ja 2R mittaukset olivat todennäköisesti virheellisiä, koska tulokset olivat muita näytteitä selvästi alempia ja kaukana minimiraja-arvoista. Nämä tulokset tukivat arvioita näytteiden liiallisesta jäykkyydestä, koska näiden näytteiden jäykkyydet olivat suurimmat. Myös näytteen 2DB tulos oli todennäköisesti virheellinen, koska tulokseksi tuli ($N_f > 100000$) selvästi muita näytteitä suurempi arvo. Tämä tulos jätettiin kuvasta pois, koska yksittäinen suuri arvo (todennäköisesti virheellinen) heikensi kuvan havainnollisuutta ja tarkkuutta. Muista merkityistä näytteistä ei osattu yhtä selvästi erotella virheellisiä mittauksia todellisista arvoista. Esimerkiksi näytteellä 1BC oli muita sen alueen näytteitä selvästi suuremmat arvot, mutta vastaavansuuruisia arvoja oli myös muilla alueilla.



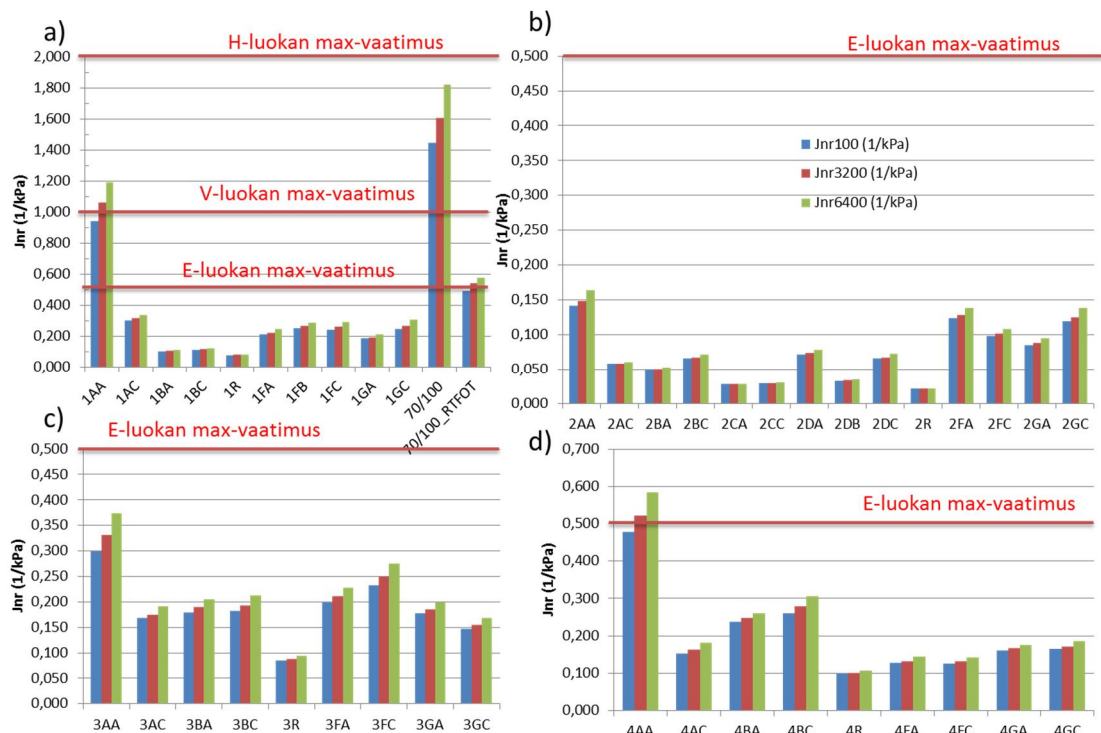
Kuva 48. LAS-testin tulokset ja raja-arvot, kun $N_f = 2,5\%$.

Muutamaa edellä esitettyä poikkeusta lukuun ottamatta muut tulokset täyttivät S-luokan raja-arvon ja suurimmaksi osaksi myös H-luokan, jotka voidaan Suomen tiellä olevien liikennemäärien perusteella katsoa riittäviksi. Yleisesti korkeimmat parametrien arvot saatiin alueella 2, jossa oli keskimäärin pienimmät tunkeumat. Tällä alueella suurin osa näytteistä täytti myös V- ja E-luokan kriteerit. Kuvasta voidaan havaita, että kaikilla muilla alueilla paitsi alueella 3, kolmesta porapalasta uutettu bituminäyte (näytekkoodi **A) sai systemaattisesti alempia arvoja kuin yhdestä porapalasta uutetusta näytteestä (näytekkoodi **C). Alueella 3 uutetun näytemäärän välillä ei ollut merkittävää eroa. Sen sijaan Rem-toimenpiteellä ei näyttänyt olevan merkittävää vaikutusta tuloksiin millään alueella, jos vertailu tehdään vain **A- tai **C-näytteiden kesken. Tulosten analysointi vaatii lisää tutkimusta ennen tarkempien päätelmien tekemistä, mikä ei kuulunut tämän diplomityön laajuuteen.

Yhdysvalloissa deformaatiokestävyyden arviointiin on kehitetty MSCR-testi. Testin avulla voidaan laskea useita erilaisia parametreja, mutta laadunvalvonnan kannalta tuloksista lasketuille parametreille $J_{nr,3,2}$ ja $J_{nr,diff}$ on asetettu (AASHTO MP 19-10) vähimmäisvaatimukset, jotka riippuvat $J_{nr,3,2}$ -arvolla tien kuormitusluokasta (taulukko 10). Standardiluonnoksessa (AASHTO TP 70-11) testi tehdään RTFOT-vanhennetulle bitumille ja mittauslämpötila on PG-luokituksen ylälämpötila ja tällä tavalla mitattuja tuloksia voidaan suoraan verrata taulukon 10 vaatimuksiin. Koska tämän tutkimuksen näytteet olivat tiellä vanhentuneita ja MSCR-testin mittauslämpötilaa (50 °C) ei valittu tar-

kasti PG-yläluokituslämpötilan mukaan, eivät tulokset ole täysin vertailukelpoisia taulukon 10 vaatimuksiin, mutta antavat silti tietoa näytteiden deformaatiokestävyydestä.

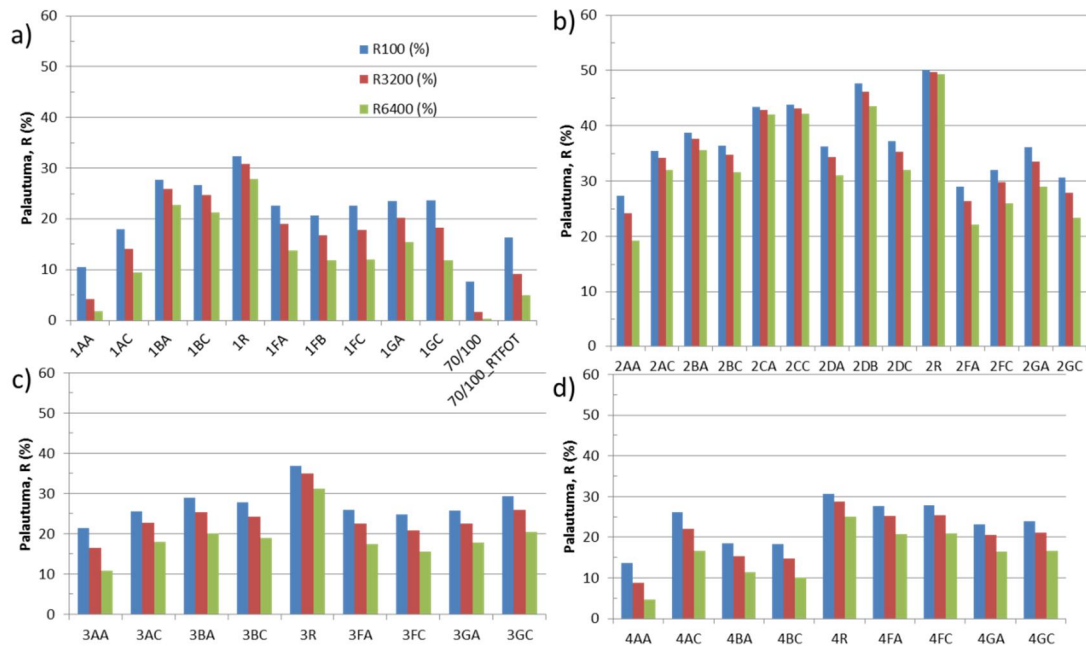
Kaikki MSCR-testin mittaustuloksista lasketut parametrit on esitetty liitteen E taulukoissa E.1 ja E2. Kuvissa 49 ja 50 on esitetty aleittain J_{nr} - ja R-arvot jännityksillä 0,1, 3,2 sekä 6,4 kPa. Kuvaan 49 on lisätty myös eri kuormitusluokille määritetyt palautumattoman leikkausmyötäämisen (J_{nr}) vaatimukset, joita ei saa ylittää. Kuormitusluokkien kriteerit lasketaan jännityksellä 3,2 kPa (kuvien punaiset pylväät) ja ne on esitetty myös taulukossa 10. Kuvien 49 ja 50 kuvaajissa a) on lisäksi esitetty referenssibitumin ja sen RTFOT-vanhennetun näytteen tulokset. Kuvan 49 kuvaajat eivät ole samassa skaalassa, kun taas kuvassa 50 ne ovat.



Kuva 49. Palautumattoman leikkausmyötäämisen arvot eri jännityksillä alueittain (a...d) sekä eri luokkien vaatimusrajat.

MSCR-testin tuloksista voidaan helposti myös havaita liuottimen vaikutus varsinkin näytteissä 1AA, 2AA, 3AA ja 4AA, joka ilmenee muita alueen näytteitä suurempina J_{nr} -arvoina ja pienempinä R-arvoina. Tulokset sopivat yhteen tunkeumasta mitattujen tulosten kanssa. Liuotinta sisältävä näyte oli pehmeämpää, jolloin palautumaton viruminen oli suurempaa ja toisaalta kuormituksesta palautuvan osuuden määrä oli pienempi.

Kaikkiaan, koska jokainen näyte (referenssinäytteitä lukuun ottamatta) on jo selvästi vanhentunut, ei deformaatiourautuminen ole ongelmana. Tämä näkyy selvästi myös J_{nr} -arvojen tuloksissa, sillä tiukimmankin E-kuormitusluokan vaatimukset alittuvat selvästi kaikilla näytteillä (pl. liuotinta sisältävät näytteet ja referenssit). Standardin vaatimukset on asetettu RTFOT-vanhennetuille näytteille ja RTFOT-vanhennettu referenssibitumi (70/100_RTOT) läpäisee kaikki muut paitsi tiukimman E-luokan vaatimuksen, kun mittaustemperatura on 50 °C. Koska E-kuormitusluokka on tarkoitettu vain runsaasti liikennöidyille satama- tai tullialueille, jossa ajonopeudet ovat pieniä ja raskaiden ajoneuvojen osuus on suuri, voidaan näytteen olettaa täyttävän standardin vaatimukset, kun lämpötila on 50 °C.



Kuva 50. Palautumaprosentit eri jännityksillä alueittain (a...d).

Kuvasta 50 voidaan havaita jo aiemmin tehtyjen päätelmien perusteella, että enemmän vanhentuneilla jäykillä näytteillä palautuman osuus on suurempi. Esimerkiksi tunkeumaltaan jäykimmän näytteen (2R) R-arvo oli noin 50 %, kun se esimerkiksi 70/100-RTFOT-näytteellä jäi jännityksen suuruuden mukaan 10 % molemmille puolille.

Liitteessä E on taulukoitu myös parametrien R ja J_{nr} erotusarvot eli kuinka paljon kuoritusjännityksen muuttaminen vaikutti parametrien tuloksiin. Tuloksia voidaan havaita myös vertaamalla kuvien 49 ja 50 kunkin näytteen suuruksia eri jännityksillä (vaihtelut palkkien korkeudessa näytteittäin). Jo kuvista voidaan sanoa, että vaihtelut olivat melko pieniä, joten erotusarvoparametritkin jäivät pieniksi, mikä on merkki näytteiden hyvästä lineaarisesta käyttäytymisestä. Taulukon 10 vaatimuksen mukaan $J_{nr,diff}$ (jännityksien 3,2 ja 0,1 kPa välillä) ei saa olla suurempi kuin 75 % ja tämä vaatimus toteutui kirkkaasti kaikilla näytteillä. Näytteellä 70/100-RTFOT arvo oli noin 10 % ja useimmilla näytteille se oli vieläkin alempi.

MSCR-testin tarkoituksena oli arvioida näytteiden deformaatiokestävyyttä. Tuloksista voidaan selvästi havaita, että tiellä vanhentuneet näytteet omasivat erinomaiset deformaatiokestävyysominaisuudet, mikä oli oletettavaa. MSCR-testin tulosten tarkempi vertailu ja analysointi eivät kuuluneet tämän työn laajuuteen. Tuloksista on kuitenkin havaittavissa, että niissä näyttää olevan samanlaisia yhtäläisyyksiä kuin muista tuloksista on jo tehty.

5 Taajuuspyyhkäisymittausten perustarkastelu

5.1 Haihdutuksessa jääneen liuottimen vaikutus

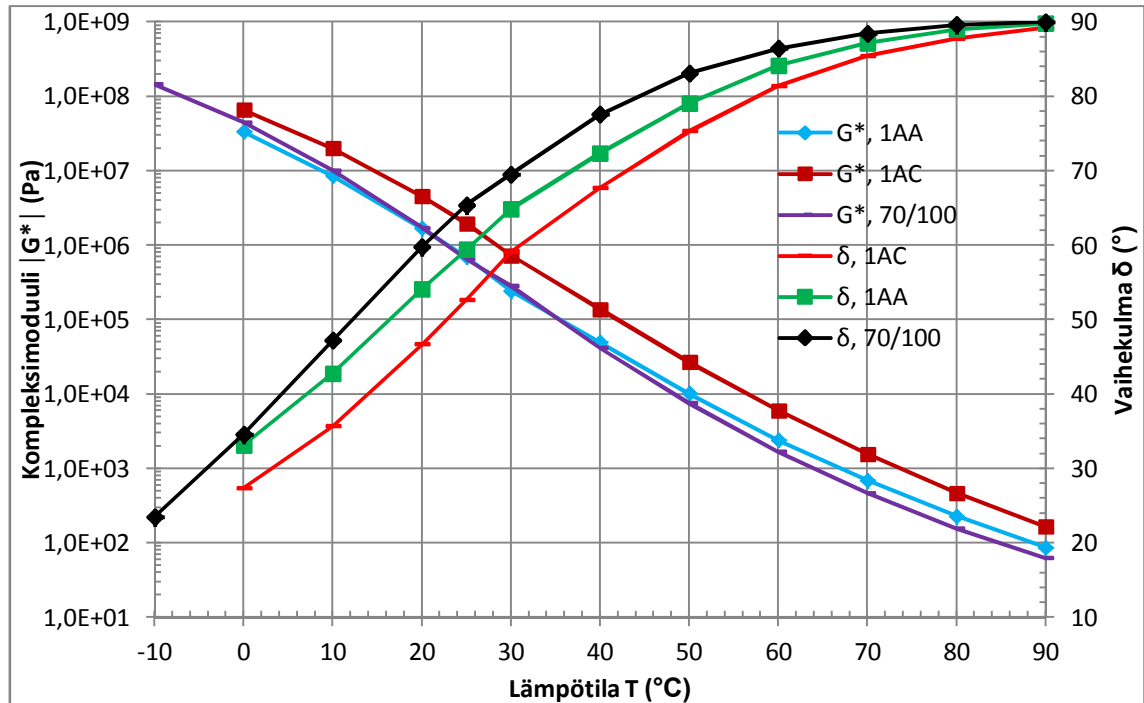
Referenssibituminäytteitä lukuun ottamatta kaikki tutkimuksen bituminäytteet ovat peräisin asfalttipäällysteen massasta. Bituminäytteet eroteltiin kiviaineksesta metyleenikloridi-liuottimen avulla uuttosuodatuksessa. Tämän jälkeen liuotin poistettiin bitumista haihduttamalla. Kuten tutkimuksessa on jo aiemmin käynyt ilmi, kaikilla näytteillä haihdutus ei onnistunut täydellisesti, vaan osa metyleenikloridista jäi bituminäytteeseen. Liuottimen esiintyminen mitattiin FTIR-laitteella ja taulukkoon 11 on kerätty näytteet, joissa liuotinta havaittiin (lihavoidut näytteet taulukossa). FTIR-laitteella havaitun metyleenikloridin muodostaman signaalin voimakkuuden perusteella liuotinta sisältävät näytteet jaettiin kolmeen luokkaan (voimakas, keskisuuri ja pieni signaali). Taulukossa on esitetty myös miten liuottimen läsnäolo vaikutti tunkeumaan, kompleksimoduuliin sekä vaihekulmaan. Vertailuarvoiksi valittiin samasta kohdasta otettu näyte (taulukon lihavoimattomat näytteet). Liuottimen vaikutuksen vertailu tehtiin tunkeumien ja vaihekulmien absoluuttisilla arvoilla ($Arvo_{liuotin} - Arvo_{ei\ liuotinta}$), kun se kompleksimoduulilla tehtiin suhteellisesti ($G^*_{liuotinta} / G^*_{ei\ liuotinta}$).

Taulukko 11. (Kompleksimoduuli ja vaihekulmat, kun T=25 °C ja f=1,78 Hz)

Näyte	Liuottimen aiheuttama signaali(FTIR)	Pen (dmm)	Pen _{liu-} Pen _{ref}	G* (MPa)	G* _{liu} /G* _{ref}	δ (°)	δ _{liu} -δ _{ref} (°)
1AA	Voimakas	135	97	0,691	0,35	59,4	6,8
1AC		38		1,95		52,7	
2AA	Voimakas	39	17	2,86	0,56	47,2	3,8
2AC		22		5,15		43,4	
3AA	Voimakas	52	20	1,51	0,62	55,2	2,6
3AC		32		2,43		52,7	
4AA	Voimakas	68	38	1,61	0,56	55,1	4,7
4AC		30		2,88		50,3	
1FC	Keskisuuri	40	7	1,82	0,76	53,0	1,5
1FA		33		2,41		51,5	
1GC	Keskisuuri	41	9	1,62	0,66	53,3	2,5
1GA		32		2,47		50,8	
2FA	Pieni	28	1	3,00	0,86	48,5	1,7
2FC		27		3,48		46,8	
3FC	Pieni	40	5	1,74	0,89	55,3	0,45
3FA		35		1,96		54,9	

Metyleenikloridin vaikutus näkyy tunkeuman ja vaihekulman kasvuna sekä kompleksimoduulin pienentymisenä. FTIR-laitteella havaitun signaalin voimakkuus näkyy myös taulukon arvoissa. Voimakkaat signaalit aiheuttivat myös taulukossa 11 näkyvät suurimmat muutokset. Bituminäytteeseen jäänyt nestemäinen metyleenikloridi pehmentää näytettä, jolloin mitatut tunkeuma-arvot ovat liian suuria ja vastaavasti kompleksimoduularvot liian pieniä. Samalla täysin viskoosi nestemäinen liuotin muuttaa bitumin viskoelastista suhdetta viskoosimpaan suuntaan, mikä näkyy vaihekulmien kasvuna.

Kuvissa 51 ja 52 on esitetty vielä yksityiskohtaisemmin ja laajemmin, miten liuotin vaikuttaa reometrillä mitattuihin tuloksiin. Tarkempi vertailu tehtiin vain näytteille 1AA (liuottimen määrä suurin) ja 1AC. Kuvissa on esitetty myös tuoreen referenssibitumin (näyte 70/100) kuvaajat. Kuvassa 51 näytteitä on vertailtu lämpötilan suhteen isokronisessa kuvaajassa taajuudella 1,78 Hz ja kuvassa 52 Black diagrammin avulla.

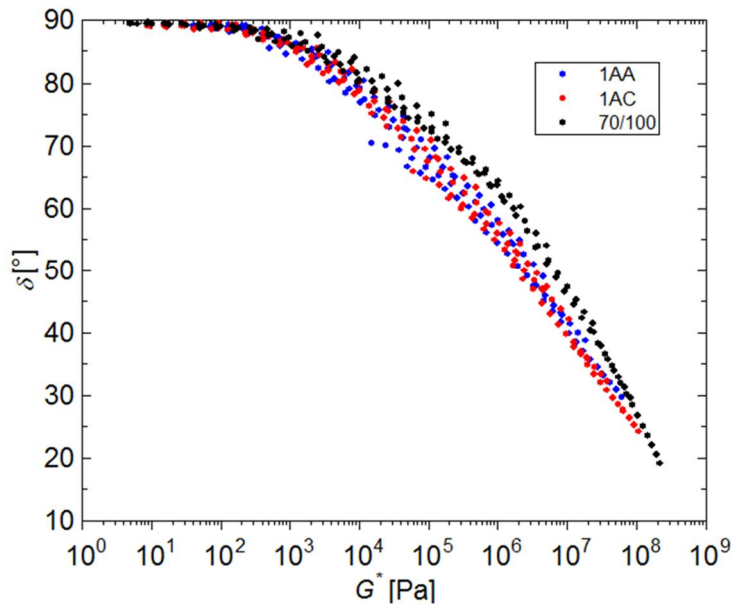


Kuva 51. Liuottimen vaikutus kompleksimoduulin ja vaihekulmien arvoihin eri lämpötiloissa.

Isokroninen kuvaaja vahvistaa jo taulukossa 11 yksittäisessä pisteessä mitattua tulosta. Liuottimen läsnäolo bituminäytteessä alentaa systemaattisesti kompleksimoduulien arvoja sekä kasvattaa vaihekulmia kaikilla mitatuilla lämpötiloilla. Korkeissa lämpötiloissa vaihekulmien erot pienenevät, koska ominaisuudet lähestyvät täysin viskoosia käyttäytymistä eli vaihekulmaa 90 °. Vaikka liuotin muuttaa näytteen tuloksia, sekä kompleksimoduulin että vaihekulmien kuvaajien muoto kuitenkin säilyy samanlaisena eli sen lämpötilaherkkyys pysyy samanlaisena. Tämä saattaa johtua siitä syystä, että metyleenikloridi on neste, jonka reologiset ominaisuudet eivät muutu lämpötilan mukaan. Kuvasta nähdään, että vaikka liuotin alentaa kompleksimoduulin arvot tuoreen bitumin veroisiksi, ei vaihekulma nouse tuoreen bitumin arvoihin.

Isokronisten kuvaajien muodon säilyminen voidaan havainnollistaa myös kuvan 52 Black diagrammista. Liuottimen läsnäolo ei muuta näytteen kompleksimoduulin ja vaihekulman välistä riippuvuutta eli Black diagrammin kuvaajat ovat näytteillä 1AA ja 1AC lähes yhtenevät. Vaikka yksittäisessä mittapisteessä näytteiden arvot eroavat toisistaan huomattavasti (kuva 51), asettuvat ne silti samalle Black diagrammin käyrälle eli jäykkyyden ja viskoelastisen riippuvuuden suhde pysyy samanlaisena.

Muillekin liuotinta sisältäville näytteille tehtiin samanlainen tarkastelu ja tulokset olivat samankaltaisia. Koska liuottimen määrä oli suurinta näytteessä 1AA, eivät muiden näytteiden erot isokronisissa kuvaajissa olleet niin suuria. Kaikki tutkittavat näyteparit antoivat myös yhtenevät Black diagrammit.



Kuva 52. Liuottimen vaikutus Black diagrammissa.

5.2 Uutetun bitumin määrän vaikutus mittaustuloksiin

Tutkimuksessa näytteitä kerättiin laajasti jokaiselta koalueelta, mikä mahdollisti myös rinnakkaisten näytteiden tutkimisen. Tutkimuksessa selvitettiin vaikuttaako poranäytteistä uutetun bitumin määrä mittaustuloksiin. Tutkimuksen näytteet **A (1AA, 2BA ym.) koostuivat kolmen porapalan sideaineesta ja näytteet **C (1AC, 3FC ym.) yhden. Vertailtavat porapalat (esim. kohdasta 1BA ja 1BC) otettiin samasta tien kohdasta ja, jos kohdan massa oletetaan homogeeniseksi, näytteiden välillä olevat erot johtuvat laboratoriomittauksissa syntyvistä eroista.

Yhdestä ja kolmesta porapalasta saatavien bituminäytteiden vertailu on tehty taulukossa 12 ja tulokset on havainnollistettu kuvissa 53 ja 54. Taulukossa on listattu näytteiden tunkeumat, kompleksimoduulit ja vaihekulmat ($T = 25\text{ °C}$ ja $f = 1,78\text{ Hz}$) sekä absoluuttiset erot tunkeumissa ja vaihekulmissa sekä suhteelliset erot kompleksimoduuleissa kaavoilla

$$pen_{ero} = pen_{**A} - pen_{**C} \quad (25)$$

$$\delta_{ero} = \delta_{**A} - \delta_{**C} \quad (26)$$

$$G^*_{ero} = \frac{G^*_{**A}}{G^*_{**C}}, \quad (27)$$

jossa arvojen alaindeksit **A kuvaavat kolmesta porapalan sideaineesta koostuvaa näytettä ja vastaavasti alaindeksit **C yhdestä porapalan sideaineesta koostuvaa näytettä. Taulukossa on ilmoitettu myös ne näytteet, joihin on jäänyt liuotinta sekä kuinka paljon. Positiiviset pen_{ero} -arvot kuvaavat, että kolmesta porapalasta koostuva bituminäyte on pehmeämpää kuin yhdestä porapalasta ja vastaavasti, jos moduuliarvojen suhde (G^*_{ero}) on vähemmän kuin yksi, on vaikutus sama. Positiiviset δ_{ero} -arvot taas kuvaavat, että kolmesta porapalasta koostuva näyte on vähemmän elastista eli virtaavampaa kuin yhdestä porapalasta saatu näyte.

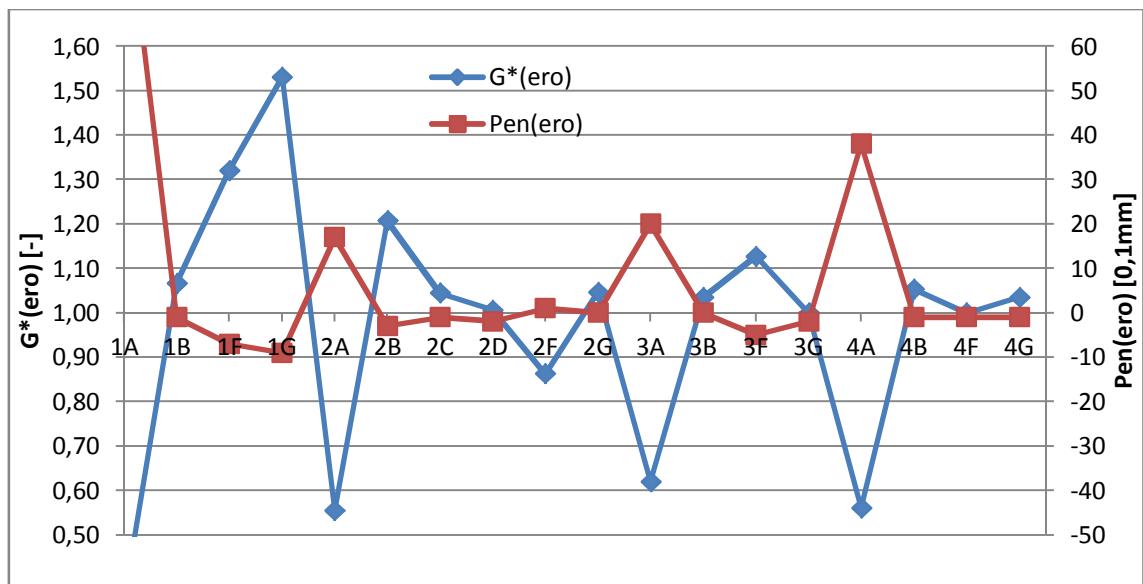
Taulukko 12. Yhdestä ja kolmesta porapalasta saatavien bituminäytteiden vertailu. Vertailut G^* - ja δ -arvoissa on tehty lämpötilassa $T=25\text{ °C}$ ja taajuudella $f = 1,78\text{ Hz}$.

Vertailu- kohta	Näyte	Liutointa	Pen (0,1mm)	Pen _{ero}	G* (MPa)	G* _{ero}	δ (°)	δ _{ero} (°)
1A	1AA	Voimakas	135	97	0,691	0,35	59,4	6,8
	1AC		38		1,95		52,7	
1B	1BA		25	-1	4,05	1,07	47,2	0
	1BC		26		3,80		47,2	
1F	1FA	Keskisuuri	33	-7	2,41	1,32	51,5	-1,5
	1FC		40		1,82		53,0	
1G	1GA	Keskisuuri	32	-9	2,47	1,53	50,8	-2,5
	1GC		41		1,62		53,3	
2A	2AA	Voimakas	39	17	2,86	0,56	47,2	3,8
	2AC		22		5,15		43,4	
2B	2BA		21	-3	5,25	1,21	42,5	-0,6
	2BC		24		4,35		43,1	
2C	2CA		17	-1	7,20	1,04	40,8	0,3
	2CC		18		6,89		40,4	
2D	2DA		23	-2	4,12	1,01	44,7	1,4
	2DC		25		4,10		43,3	
2F	2FA	Pieni	28	1	3,00	0,86	48,5	1,7
	2FC		27		3,48		46,8	
2G	2GA		28	0	3,43	1,05	48,0	0,1
	2GC		28		3,28		47,9	
3A	3AA	Voimakas	52	20	1,51	0,62	55,2	2,58
	3AC		32		2,43		52,7	
3B	3BA		35	0	2,05	1,03	53,3	-0,3
	3BC		35		1,98		53,6	
3F	3FA	Pieni	35	-5	1,96	1,13	54,9	-0,4
	3FC		40		1,74		55,3	
3G	3GA		31	-2	2,17	1,00	53,5	0,6
	3GC		33		2,17		53,0	
4A	4AA	Voimakas	68	38	1,61	0,56	55,1	4,7
	4AC		30		2,88		50,3	
4B	4BA		32	-1	2,61	1,05	51,3	-0,1
	4BC		33		2,48		51,4	
4F	4FA		27	-1	3,01	1,00	48,8	0,5
	4FC		28		3,01		48,4	
4G	4GA		28	-1	3,06	1,04	49,7	0,4
	4GC		29		2,96		49,2	
Keskiarvo				-1,2		1,05		0,2
Keskihajonta				0,92		0,061		0,55

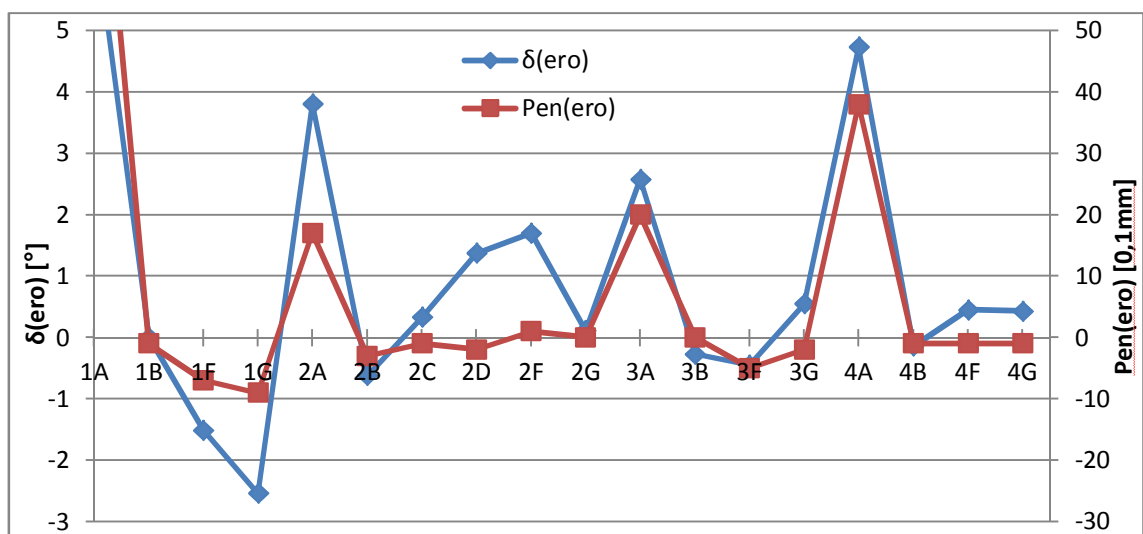
Näytteeseen jäänyt liuotin vääristää ja vaikeuttaa tuloksista tehtäviä päätelmiä. Näytteisiin **A jäänyt liuotin vääristää tuloksia suurentaen pen_{ero}- ja δ_{ero} -arvoja ja pienentäen G^*_{ero} -arvoja. Taulukosta nähdään, että vain näissä tapauksissa (vertailut 1A, 2A, 2F, 3F ja 4F) pen_{ero}-arvot olivat positiivisia ja G^*_{ero} -arvot pienempiä kuin yksi. Tämä on nähtävissä myös kuvassa 53. Näiden näytteiden vertailuissa myös δ_{ero} -arvot olivat suurimpia, vaikka myös muita positiivisia arvoja saatiin (kuva 54). Vastaavasti näytteisiin **C

jäänyt liuotin vääristää tuloksia pienentäen pen_{ero} - ja δ_{ero} -arvoja ja suurentaen G^*_{ero} -arvoja. Näissä vertailuissa kohtien 1F ja 1G pen_{ero} - ja δ_{ero} -arvot olivat pienimmät ja G^*_{ero} -arvot suurimmat aivan kuten oli oletettua. Koska näytteeseen 3FC jäi vain vähän liuotinta, eivät erot kasvaneet niin paljon, vaikka samanlainen trendi oli nähtävissä tunkeumassa ja kompleksimoduuleissa.

Taulukon loppuun on laskettu myös vertailuarvojen keskiarvot ja keskihajonnat. Liuotinta sisältävät näytteet on jätetty laskuista pois. Jos liuotinta sisältäviä näytteitä ei oteta mukaan, havaitaan, että pen_{ero} -arvot ovat kaikissa vertailuissa välillä 0...-3 eli kaikissa tapauksissa kolmesta porapalasta saatu näyte oli tunkeumaltaan pienempi (jäykempi) tai yhtä suuri. Vastaavat tulokset saatiin kompleksimoduulien vertailuista. Kaikissa näytteissä kolmesta porapalasta saatu näyte oli G^* -arvoiltaan suurempi (jäykempi) tai yhtä suuri ja G^*_{ero} -arvot olivat välillä 1,00...1,21. Vaihekulmia vertailtaessa ei niin yhdenmukaista tulosta saatu, sillä δ_{ero} -arvot vaihtelivat välillä -0,6...0,6 °. Kuvista 53 ja 54 voidaan huomata, että tunkeumien avulla lasketut vaihtelut mukailevat hyvin sekä kompleksimoduulilla että vaihekulmilla laskettuja vaihteluita.



Kuva 53. Uutetun bitumin määrän vaikutus tunkeumiin ja kompleksimoduuleihin.



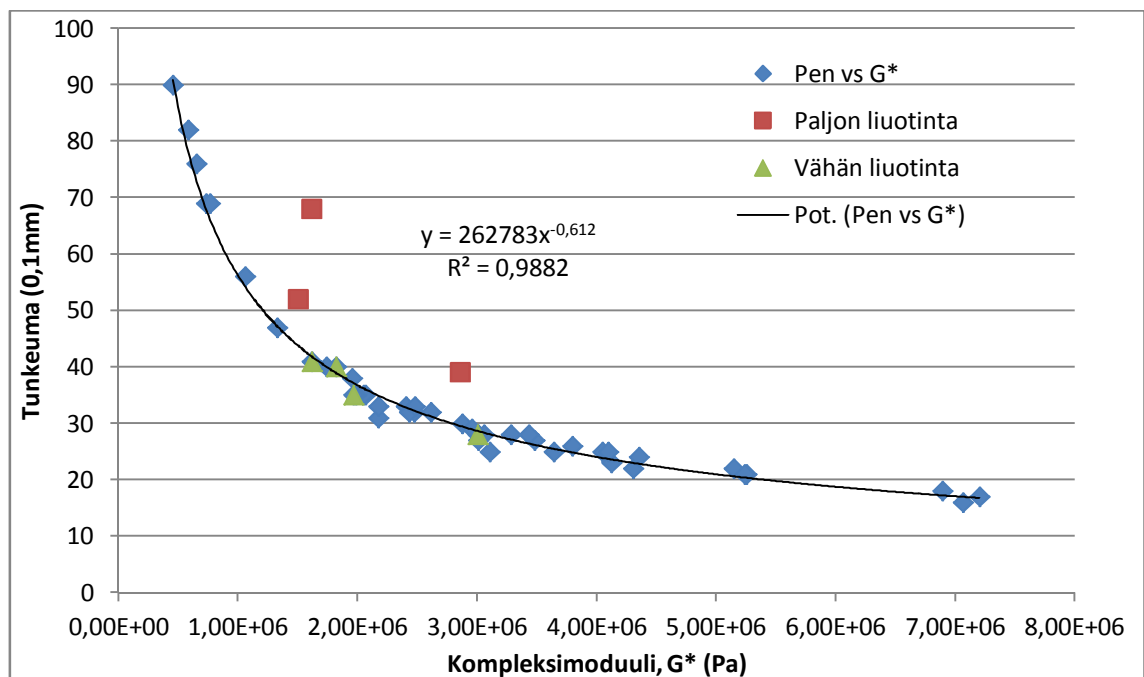
Kuva 54. Uutetun bitumin määrän vaikutus tunkeumiin ja vaihekulmiin.

Tuloksien perusteella voidaan päätellä, että keskimäärin kolmesta porapalasta saatu näyte oli hieman jäykempi kuin yhdestä porapalasta saatu näyte, joka ilmeni keskimäärin yhtä tunkeuma-arvoa alempina sekä kompleksimoduuleissa 5 % suurempina arvoina. Tämä saattaa johtua haihdutuksen jälkeen tapahtuvasta bituminäytteen siirtämisestä haihdutuksessa käytettävästä pullosta säilytysastiaan. Bitumi siirretään pullosta astiaan valuttamalla näyte uunissa hieman korotetuissa lämpötiloissa. Kaikkea bitumia ei ole mahdollista saada pois pullosta ilman, että lämpötilaa nostetaan niin korkeaksi, että näytteen vanheneminen tehostuu liikaa. On havaittu, että pullon sisäpinnalle jää aina suunnilleen sama määrä bitumia. On todennäköistä, että bitumin raskaampi ja jäykempi asfalteeninen osa jää helpommin pulloon kuin sen pehmeämmät ja kevyemmät osat. Jos oletetaan, että pulloon jää aina sama määrä bitumia riippumatta alkuperäisestä pullossa olevasta bitumin määrästä, yhdestä näytteestä jäävän raskaamman ja jäykemmän bitumin osuus on suhteellisesti suurempi kuin useammasta näytteestä jäävä. Tällöin voidaan olettaa, että pienempi haihdutuksessa oleva bitumin määrä pehmentää tutkittavaa bitumia suhteessa suurempaan määrään. Koska keskiarvolliset erot olivat kuitenkin niin pieniä ja esimerkiksi alle tunkeuman menetelmähajonnan, ei selviä päätelmiä tuloksista voitu tehdä.

5.3 Perinteiset vs. reometrimittaukset

Tutkimuksen aikaisemmissa osissa on jo havaittu, että perinteisillä mittauksilla saadut tulokset ovat monilta osin hyvin yhteneviä reometrillä saatuihin tuloksiin. Tässä kappaleessa eri menetelmillä saatuja mittaustuloksia on verrattu toisiinsa.

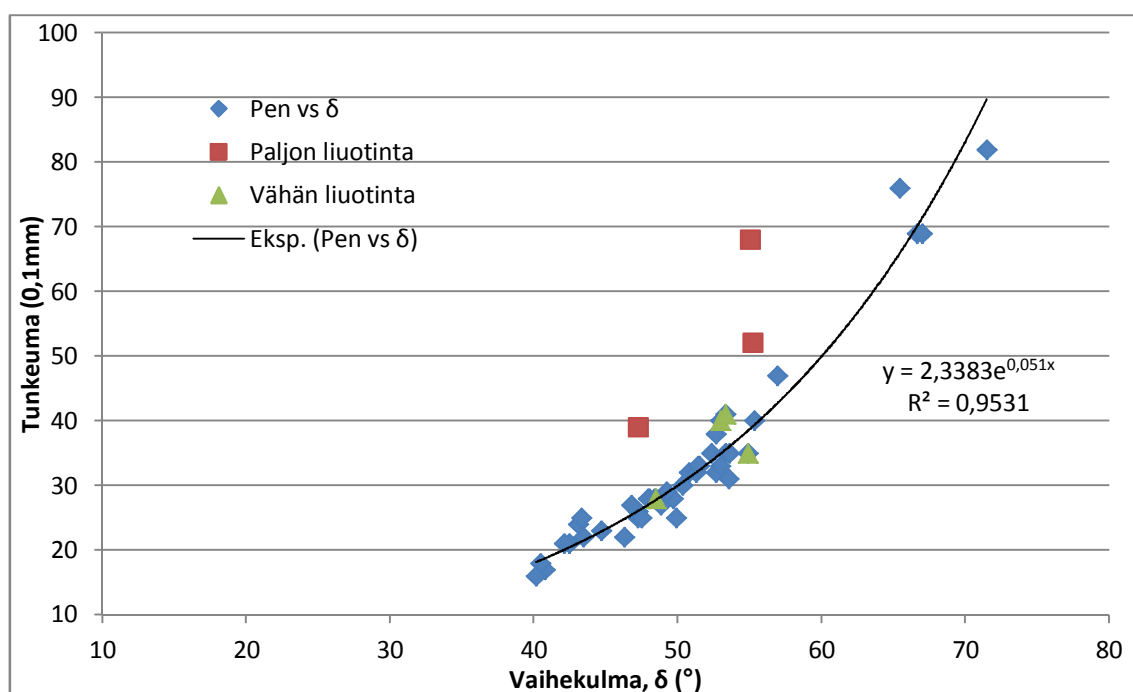
Kuvassa 55 on tunkemien ja kompleksimoduulin välinen korrelaatio. Kompleksimoduulit mitattiin lämpötilassa 25 °C (sama kuin tunkeuman mittaustemperatura) ja taajuudella 1,78 Hz. Regressioaineisto ei sisällä liuotinta sisältäviä näytteitä, mutta ne on esitetty havainnollisuuden vuoksi kuvassa. Aineistoon on sen sijaan lisätty tämän tutkimuksen näytteiden lisäksi 4 tuoretta tiebitumia, jotka täydentävät mittaustuloksia paremman mallisovituksen aikaansaamiseksi.



Kuva 55. Tunkeuma vs kompleksimoduuli, G^* ($T = 25\text{ °C}$, $f = 1,78\text{ Hz}$).

Korrelaatio tunkeuman ja kompleksimoduulin välillä on erinomainen ($R^2=0,988$). Korrelaatiokaava on potenssimuotoinen, mikä kertoo myös tunkeuman logaritmisesta käyttäytymisestä. Kun bitumin kompleksimoduuli kasvaa, sen tunkeuma pienenee korrelaatiokaavan mukaisesti. Tulosten perusteella pieni määrä liuotinta ei vaikuttanut tunkeuman ja kompleksimoduulin väliseen yhteyteen. Koska korrelaatio on hyvä, voidaan korrelaatiokaavan avulla arvioida melko luotettavasti tuoreen ja vanhenneiden modifiointomattomien bitumien käyttäytymistä vain toisen parametrin avulla.

Tunkeumien ja vaihekulmien korrelaatio on esitetty kuvassa 56, kun vaihekulmat mitattiin lämpötilassa 25 °C ja taajuudella 1,78 Hz. Myös näiden välillä korrelaatio oli hyvä. Kun vaihekulman arvot kasvavat, kasvavat myös tunkeumat eli, kun bitumi muuttuu juoksevammaksi, se myös pehmenee. Paras vastaavuus syntyi eksponentiaalisella korrelaatiolla. Toisaalta vanhenneilla näytteillä tunkeuman ja vaihekulman välillä oli lähes lineaarinen suhde. Paljon liuotinta sisältävät näytteet erottuvat selvästi myös tästä kuvaajasta toisin kuin vähän liuotinta sisältävät näytteet.

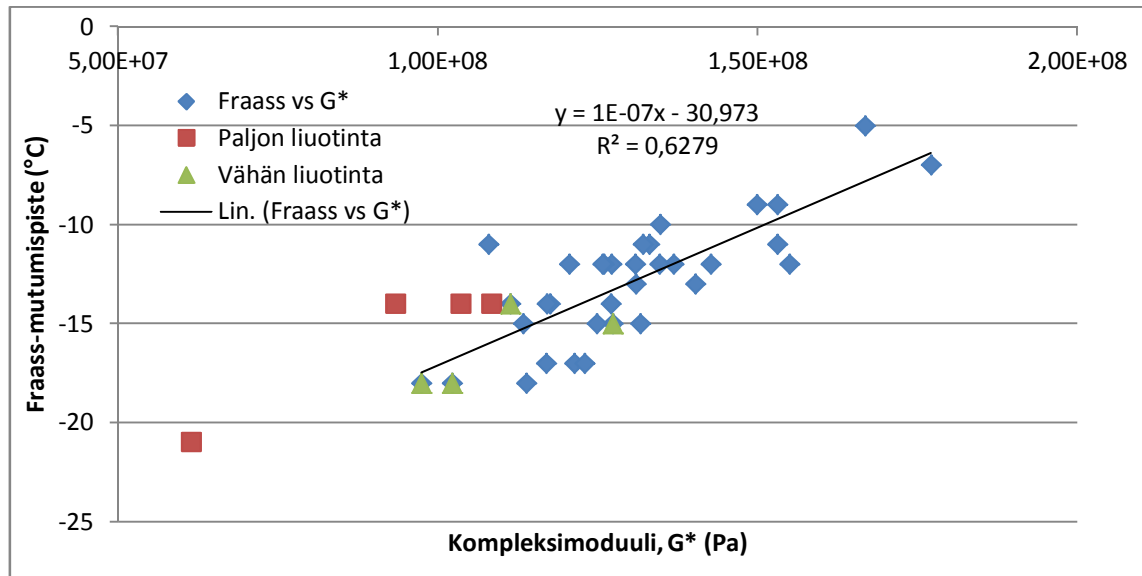


Kuva 56. Tunkeuma vs. vaihekulma, δ ($T = 25\text{ °C}$, $f = 1,78\text{ Hz}$).

Fraass-murtumispisteen ja kompleksimoduulin välinen korrelaatio on esitetty kuvassa 57. Kompleksimoduulin arvoja verrattiin alimmassa taajuuspyyhkäisyn mittaustilassa ($T = 0\text{ °C}$) ja korkeimmalla taajuudella ($f = 10\text{ Hz}$), koska ne kuvastivat lähimmin Fraass-testin kylmiä lämpötiloja. Referenssinäytteille (tuore 70/100 ja 70/100-RTFOT) ei Fraass-murtumispistettä määritetty, joten kaikki kuvan näytepisteet ovat vanhentuneita bitumeja.

Kuvaajan korrelaatio ei ole läheskään yhtä hyvä kuin tunkeuman kanssa, mutta selkeä vastaavuus tulosten välillä on kuitenkin nähtävissä. Kun kompleksimoduuli kasvaa, Fraass-murtumispiste kohoaa. Toisin sanoen mitä jäykempi bitumi on, sen hauraampaa se on, jolloin sen Fraass-murtumispiste on korkeampi (heikommat kylmäominaisuudet). Parametrien välinen korrelaatio valittiin kuvassa lineaariseksi, mutta koska kaikki mittapisteet ovat vanhenneita näytteitä, on tulosten otos melko suppea. Jos mittauksissa olisi mukana myös tuoreita bitumeja, saattaisi korrelaatiokin muuttua. Suurin syy heikkoon korrelaatioon on kuitenkin todennäköisesti Fraass-testin huono tarkkuus ja toistet-

tavuus. Kuvasta esimerkiksi nähdään, että sama murtumispistelämpötila saadaan useilla erilaisilla kompleksimoduuliarvoilla.



Kuva 57. Fraass-murtumispiste vs. kompleksimoduuli, G^* ($T = 0\text{ °C}$, $f = 10\text{ Hz}$).

5.4 Muutokset lämpötilan suhteen

Materiaalin reologiset ominaisuudet kuvataan yleisesti Master-käyrien avulla taajuuden suhteen yhdistelemällä eri lämpötiloissa mitattuja tuloksia. Bitumin reologisten ominaisuuksien muuttuminen on kuitenkin normaalisti havainnollisempaa esittää lämpötilan suhteen tietyllä taajuuden arvolla (isokroninen käyrä), koska lämpötilan muutokset ovat helpommin ymmärrettävissä ja sovellettavissa käytäntöön kuin taajuuden muutokset. Vaikka tunkeuma-arvojen ja reometrilla saatavien reologisten parametrien (G^* ja δ) välille saatiin lämpötilassa 25 °C selvä yhteys (kts. 5.3), on tarpeen tutkia tuloksia myös muissa lämpötiloissa.

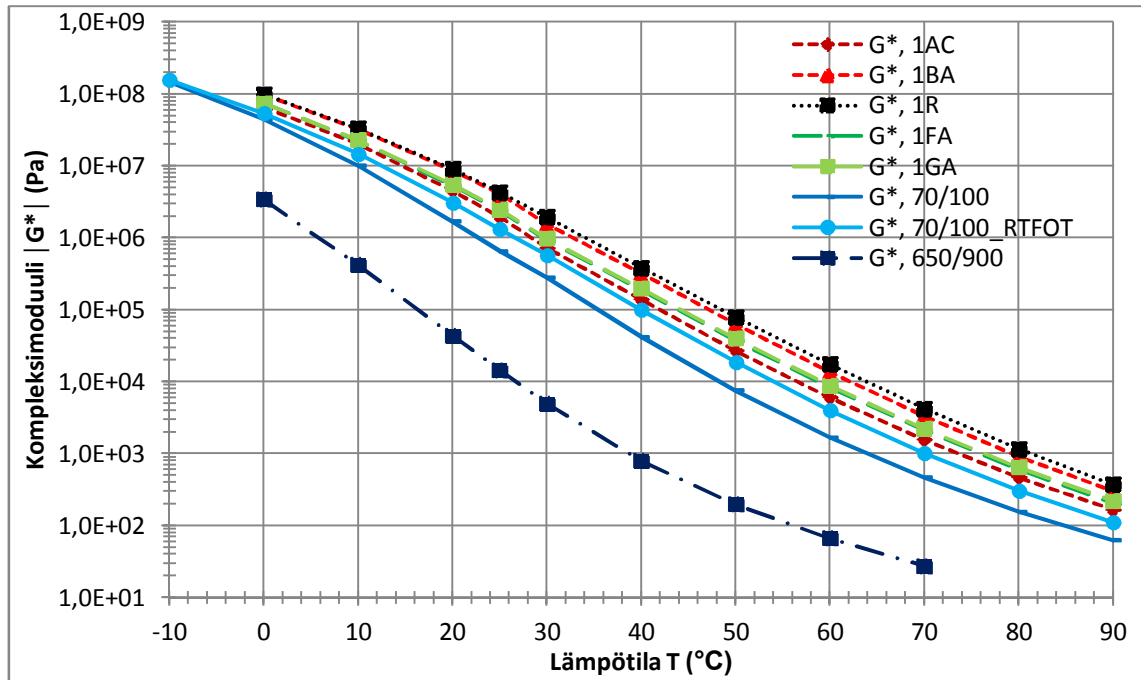
Kuvissa 58...65 on esitetty taajuuspyyhkäisydatasta saadut kompleksimoduulien ja vaihekulmien muutokset lämpötilan suhteen taajuudella $1,78\text{ Hz}$. Tarkastelu on tehty alueittain ja tavoitteena oli selvittää ja vertailla, miten kompleksimoduulin ja vaihekulman arvot muuttuivat Rem-toimenpiteen eri vaiheissa koko mitatulla lämpötila-alueella (eri näytteillä $-10\text{...}90\text{ °C}$). Koska tutkimuksen tavoitteena oli myös selvittää, kuinka hyvin Rem-toimenpiteen aikana tapahtuva elvyttäminen palautti bitumin ominaisuuksia alkuperäisiksi, jokaiseen kuvaan on lisätty myös tuoreen ja RTFOT-vanhennetun referenssi-bitumin (70/100) sekä elvyttimenä käytettävän pehmeän bitumin (650/900) käyrät. Realistisena ja teoreettisena tavoitteena elvyttämisen onnistumisessa voidaan pitää RTFOT-vanhennetun näytteen (70/100-RTFOT) arvoja, eli oletettuja bitumin ominaisuuksia uudessa päällysteessä.

Koska tutkimuksessa on jo selvitetty haihdutukseen tulevan bitumin määrän vaikutus mittaustuloksiin (kts. 5.2), vertailu tehtiin vain kolmesta porapalasta saaduille näytteille (näytteet **A). Poikkeuksina ovat jokaisen alueen ensimmäiset näytteet 1AC, 2AC, 3AC ja 4AC, koska niiden vertailunäytteet (*AA) sisälsivät merkittävästi liuotinta. Koska bitumimäärästä syntyneet erot eivät olleet merkittävän suuria (alle mittausten menetelmähajonnan), voitiin vertailu **A- ja **C-näytteiden välillä myös tehdä melko luotettavasti. Kaikkien kuvien (58...65) käyrät on merkitty samalla tavalla taulukon 13 mukaan.

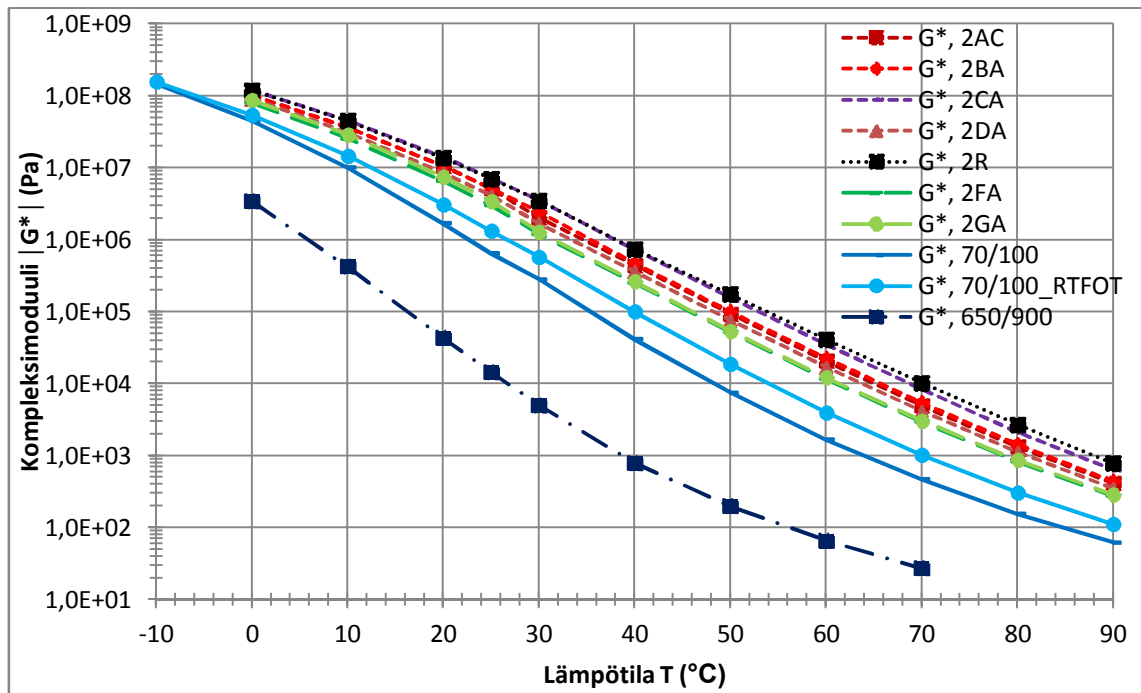
Taulukko 13. Isokronisten käyrien selitteet.

	Näytteet	Värisävy	Viivatyyppe
Ennen REM	*AC, *BA, *CA, *DA	punainen tai lila	lyhyt katkoviiva
REM aikana	*R	musta	pistekatkoviiva
Jälkeen REM	*FA, *GA	vihreä	pitkä katkoviiva
Tuore ja RTFOT-vanh.	70/100, 70/100 RTFOT	sininen	tasainen
Elvytin	650/900	tumman sininen	piste-viiva -katkoviiva

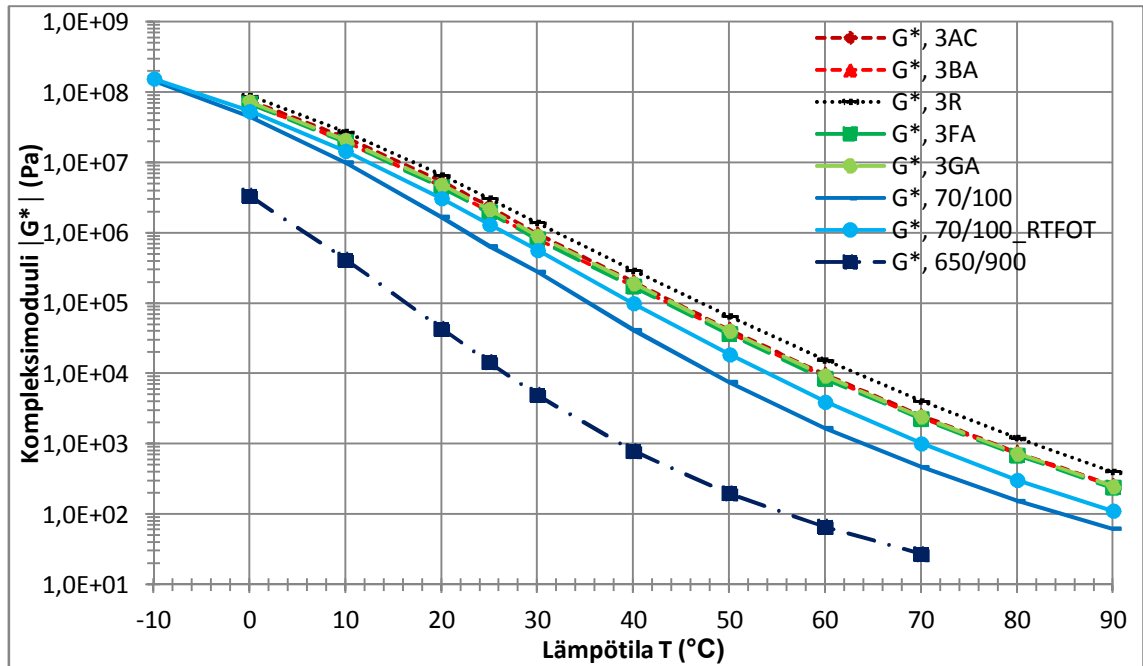
Kuvissa 58...61 on esitetty alueittain näytteiden kompleksimoduulit lämpötilan suhteen. Elvytin (650/900) erottuu kuvista selvästi muita näytteitä alemmilla G^* -arvoilla (jopa yli kaksi kertalukua), mikä on oletettavaa, koska se on muita näytteitä selvästi pehmeämpää. Kuvista nähdään myös, miten bitumin vanheneminen muuttaa sen kompleksimoduulia G^* eri lämpötiloissa. RTFOT-vanhennetulla näytteellä kompleksimoduuliarvot ovat jo selvästi suuremmat kuin tuoreella bitumilla ja kaikilla alueilla kompleksimoduuliarvot ovat vielä jatkaneet kasvamistaan eli ennen Rem-toimenpidettä olevat näytteet (punaiset käyrät kuvissa) ovat pitkäaikaisvanhennuksen takia vielä muuttuneet jäykemmiksi. Vanhennuksen vaikutuksesta tapahtuva kompleksimoduulin kasvaminen on kuvien perusteella suurempaa korkeammassa lämpötiloissa, sillä alhaisissa lämpötiloissa ($< 10^\circ\text{C}$) kaikki käyrät alkavat taas lähestyä toisiaan (elastinen asymptootti kts. 2.2.6). Kaikilla alueilla Rem-toimenpiteen aikana otetuilla näytteillä (musta pistekatkoviiva, *R) oli suurimmat kompleksimoduulit eli näyttäisi siltä, että bitumi vanhenee vielä Rem-toimenpiteen yhteydessä. Yhdelläkään alueella Rem-toimenpiteen yhteydessä tehtävä bitumin elvyttäminen ei onnistunut palauttamaan G^* -arvoja 70/100-RTFOT-tasoon, mikä voidaan havaita Rem-toimenpiteen jälkeen otettujen näytteiden (vihreät käyrät) suurempina G^* -arvoina kuin RTFOT-käyrän arvot. Tämä tarkoittaa, että käytetty elvytin tai sen määrä ei ollut riittävä laskemaan pitkäaikaisen vanhennuksen johdosta tapahtunutta bitumin jäykkyyden kasvua tavoitellulle bitumin alkuperäiselle jäykkyydelle tiellä. Samaan lopputulokseen tultiin jo verrattaessa tunkeumia ja teoreettisia tunkeumia luvussa 4.1.



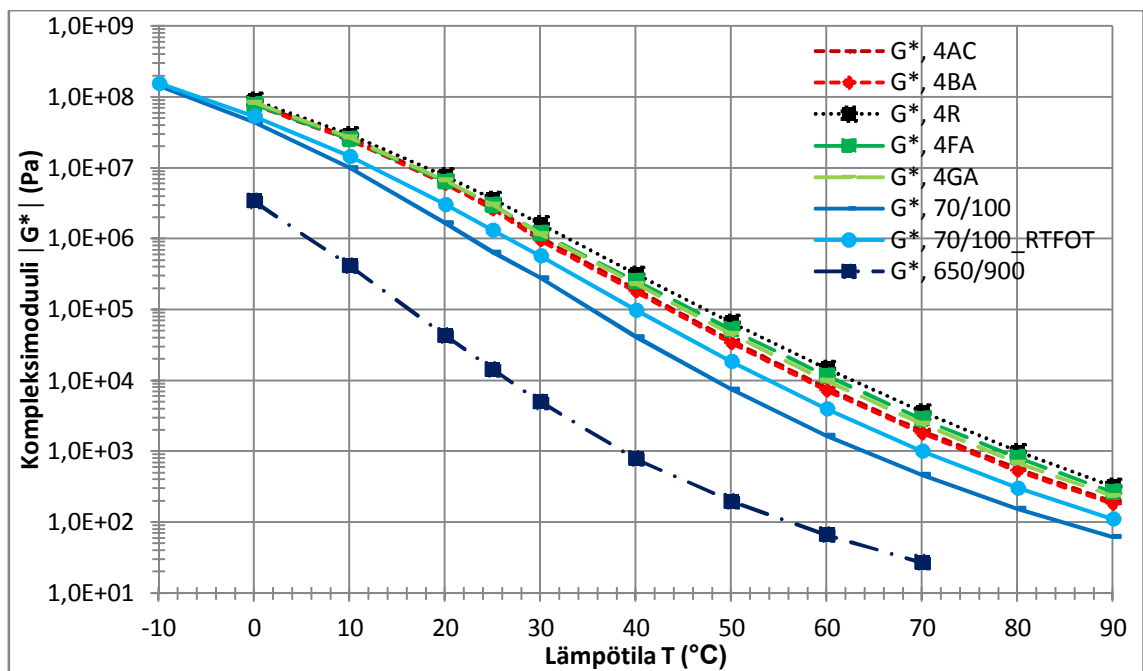
Kuva 58. Alueen 1 kompleksimoduulit lämpötilan funktiona taajuudella 1,78 Hz.



Kuva 59. Alueen 2 kompleksimoduulit lämpötilan funktiona taajuudella 1,78 Hz.



Kuva 60. Alueen 3 kompleksimoduulit lämpötilan funktiona taajuudella 1,78 Hz.



Kuva 61. Alueen 4 kompleksimoduulit lämpötilan funktiona taajuudella 1,78 Hz.

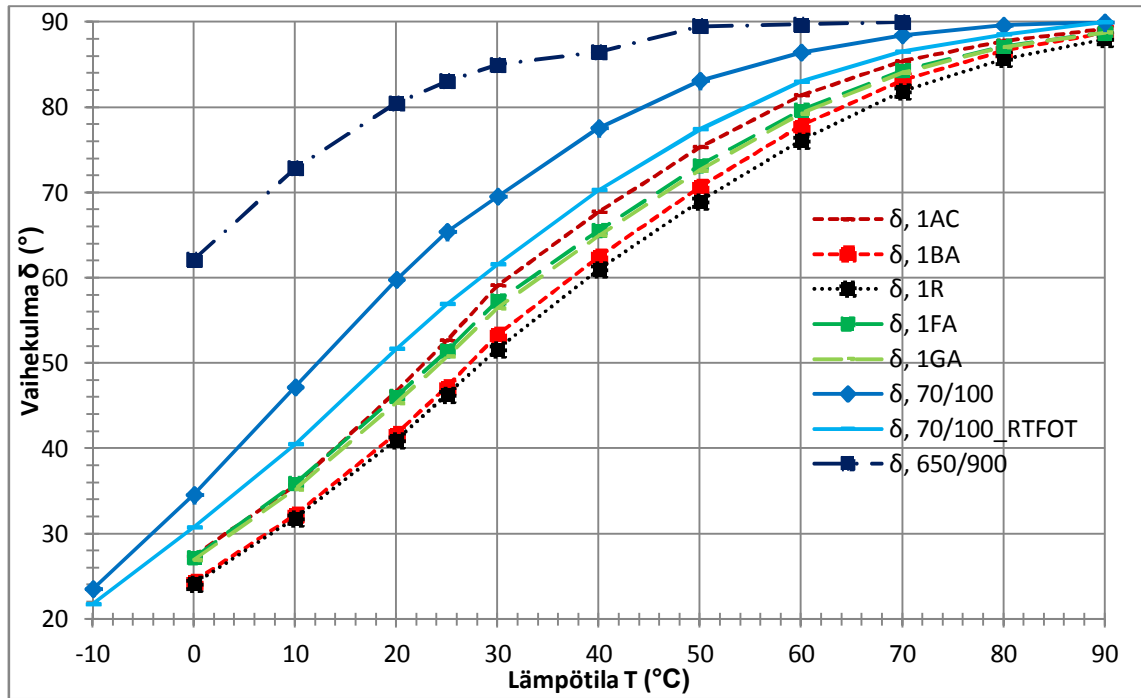
Elvyttämisen onnistumista on kannattavaa tutkia myös vertaamalla ennen ja jälkeen Rem-toimenpidettä otettuja näytteitä. Jos jälkeen toimenpiteen otettujen näytteiden kompleksimoduuliarvot ovat laskeneet alemmiksi kuin ennen toimenpidettä otettujen näytteiden arvot, on Rem-toimenpiteen yhteydessä tehty elvyttäminen onnistunut parantamaan sideainebitumin ominaisuuksia jäykkyyden osalta.

Alueella 1 (kuva 58) elvyttämisen onnistumisen vertailu oli vaikeaa. Näyte 1BA on selvästi jäykempi kuin näyte 1AC, minkä arveltiin johtuvan näytteen 1BA selvästi suuremmasta tyhjätalasta (kts. 4.1). Koska ennen Rem-toimenpidettä otetut näytteet eroavat toisistaan niin paljon, on vaikea arvioida kuinka paljon bitumi vielä jäykkenee Rem-toimenpiteessä (näyte 1R). Rem-toimenpiteen jälkeen otetut näytteet (1FA ja 1GA) ovat

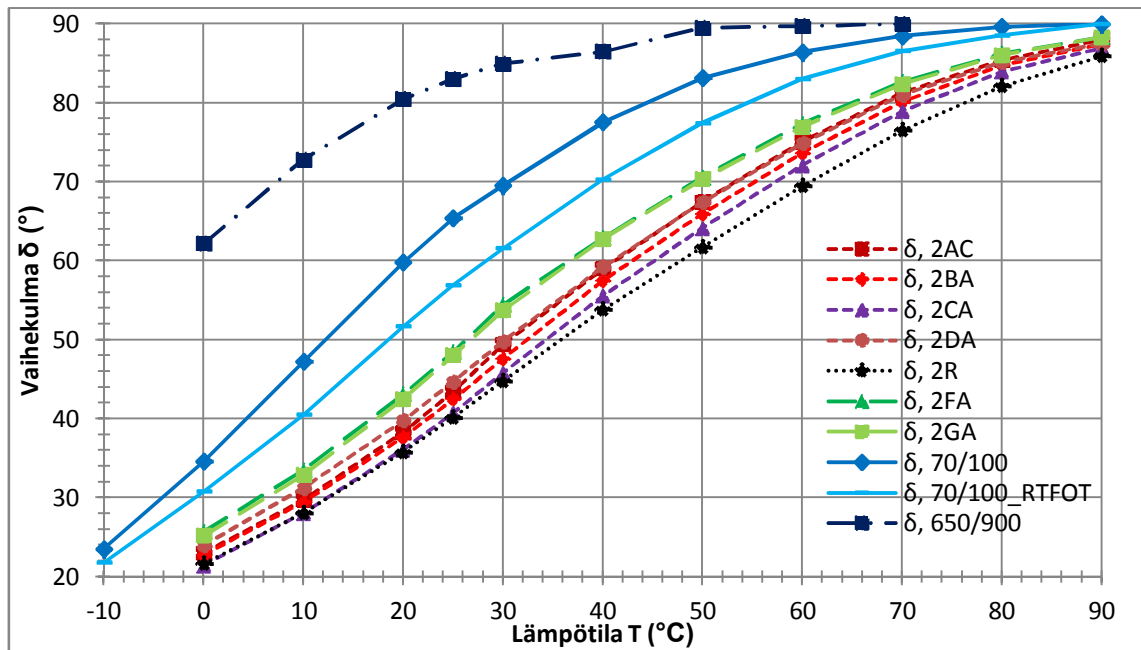
hyvin homogeenisia ainakin jäykkyydeltään, koska G^* -käyrät ovat lähes yhtenevät. Elvyttämisen onnistumisen arvioiminen alueella 1 on hankalaa, koska jälkeen otetut näytteet ovat pehmeämpiä kuin näytteet 1R ja 1BA, mutta jäykempiä kuin näyte 1AC. Elvytin kyllä onnistuu laskemaan G^* -arvoja verrattuna näytteeseen 1R. Se, onnistuuko elvyttäminen alentamaan bitumin jäykkyyttä ennen toimenpidettä olevasta arvosta vai onko Rem-toimenpiteen aikana tapahtuva bitumin jäykkyyden kasvu suurempaa kuin elvyttämisen johdosta tapahtuva jäykkyyden lasku, riippuu siitä, olivatko näytteiden 1FA ja 1GA ennen Rem-toimenpidettä olevat jäykkyydet lähempänä näytettä 1AC vai 1BA.

Vastaavanlainen tarkastelu tehtiin myös muille alueille, joissa tulokset olivat selvempiä. Alueella 2 (kuva 59) elvyttäminen onnistui laskemaan kompleksimoduulit ennen toimenpidettä otettujen näytteiden arvoja alemmiksi. Alueella 3 (kuva 60) elvyttäminen onnistui vain palauttamaan kompleksimoduuliarvot ennen toimenpidettä otettujen näytteiden arvojen tasolle. Tällä alueella Rem-toimenpiteen aikana vanhenemisen johdosta tapahtuva jäykkyyden kasvu (3R) onnistuttiin elvyttimen avulla siis vain palauttamaan ennen toimenpidettä olevaan jäykkyyteen. Alueella 4 (kuva 61) Rem-toimenpiteen jälkeen otettujen näytteiden kompleksimoduulit jäivät suuremmiksi kuin ennen toimenpidettä otettujen näytteiden arvot. Vastaavasti tällä alueella Rem-toimenpiteen aikana vanhenemisen johdosta tapahtuva jäykkyyden kasvu (4R) taas oli suurempaa kuin elvyttimen lisäyksestä aiheutunut jäykkyyden pieneneminen. Nämä tulokset tukevat luvussa 4.1 tehtyä päätelmää, että alueella 4 elvyttimen määrä jäi pienemmäksi kuin muilla kohteilla.

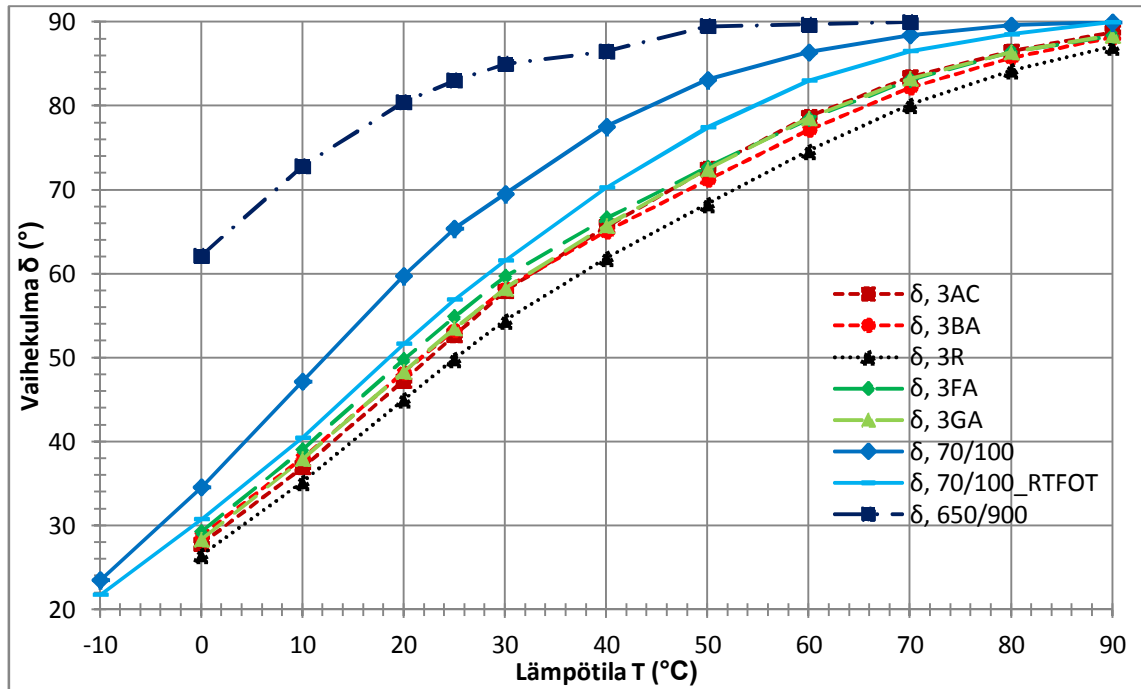
Kuvissa 62...65 on esitetty alueittain näytteiden vaihekulmat lämpötilan suhteen. Vaihekulmien osalta muutokset Rem-toimenpiteen eri vaiheiden välillä ovat melko samantaisia kuin jäykkyyden osalta, vaikka myös eroavaisuuksia oli. Elvyttimellä on muita näytteitä selvästi korkeammat vaihekulmat kaikissa lämpötiloissa ja se muuttuu täysin viskoosiksi jo lähes huoneenlämpötilassa. Kuvista nähdään selvästi, että bitumin vanheneminen alentaa merkittävästi sen vaihekulmia eli bitumista tulee elastisempaa. Jo pelkkä RTFOT-vanhentaminen, jonka on tarkoitus kuvata asfalttimassan valmistuksessa tapahtuvaa vanhenemista, laskee bitumin vaihekulmia selvästi (sinisten käyrien erot). Vastaavasti kuin kompleksimoduuliarvoissa myös vaihekulmien lasku jatkuu pitkäaikaisvanhenemisessä, mikä voidaan havaita kuvista ennen toimenpidettä otettujen näytteiden (punaiset käyrät) RTFOT-näytettä alemmina vaihekulmina. Vastaavasti myös vaihekulmissa arvot laskevat vielä Rem-toimenpiteenkin aikana, koska kaikilla alueilla Rem-toimenpiteen aikana otettu näyte (musta, pistekatkoviiva -käyrä) on vaihekulmiltaan kaikkein alhaisin eli elastisin. Aivan kuten kompleksimoduulin tapauksessa, Rem-toimenpiteen yhteydessä tehtävä bitumin elvyttäminen ei onnistunut palauttamaan vaihekulmia 70/100-RTFOT-tasoon, mikä voidaan havaita Rem-toimenpiteen jälkeen otettujen näytteiden (vihreät käyrät) RTFOT-näytettä alhaisempina vaihekulmina. Tämä tarkoittaa, että käytetty elvytin tai sen määrä ei myöskään vaihekulmia mitattaessa ollut riittävä nostamaan pitkäaikaisen vanhenemisen johdosta tapahtunutta bitumin elastisuuden kasvua tavoitellulle bitumin alkuperäiselle elastisuudelle tiellä. Myös nämä tulokset vahvistavat luvussa 4.1 tehtyä vertailuja.



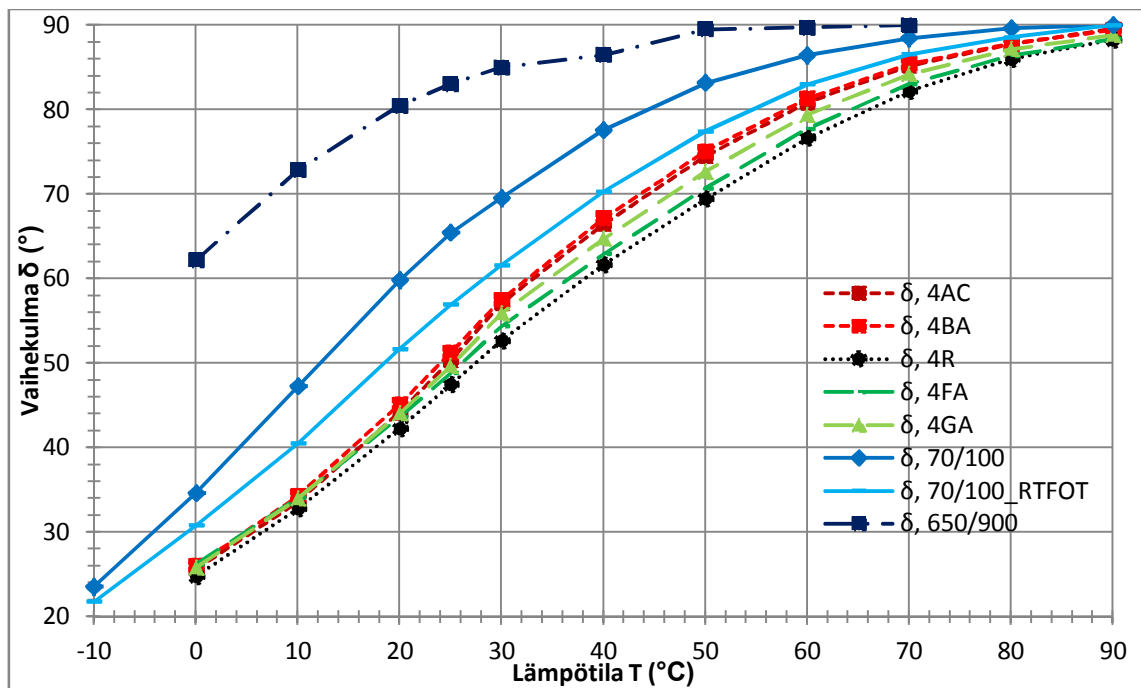
Kuva 62. Alueen 1 vaihekulmat lämpötilan funktiona taajuudella 1,78 Hz.



Kuva 63. Alueen 2 vaihekulmat lämpötilan funktiona taajuudella 1,78 Hz.



Kuva 64. Alueen 3 vaihekulmat lämpötilan funktiona taajuudella 1,78 Hz.



Kuva 65. Alueen 4 vaihekulmat lämpötilan funktiona taajuudella 1,78 Hz.

Vaikka suuret trendit kompleksimoduulien ja vaihekulmien välillä ovat yhteneviä, ilmeni vaihekulmia vertailemalla vaihtelevaa käytöstä sekä alueittain että Rem-toimenpiteen vaikutuksessa, mitä kompleksimoduulin käyrästä ei havaittu.

Pitkäaikaisvanhenemisessa tapahtuvat vaikutukset bitumin vaihekulmien laskuna vaihtelivat lämpötilan suhteen alueittain. Alueella 2 (kuva 63) vaihekulmien lasku (elastisuuden kasvaminen) oli voimakkainta. Tällä alueella ennen Rem-toimenpidettä otettujen näytteiden (punaiset käyrät) vaihekulmat olivat kaikissa lämpötiloissa selvästi RTFOT-arvoja alempia. Vaihekulmien lasku näyttäisi olevan voimakkainta mittauksen keskilämpötiloissa (20...50 °C), sillä näitä korkeammissa lämpötiloissa myös jäykät ja

vanhentuneet näytteet alkavat lähestyä täysin viskoosia materiaalikäyttäytymistä eli vaihekulman maksimiarvoa 90° , joka pehmeämmillä näytteillä saavutetaan jo aikaisemmin. Vastaavasti alemmissa lämpötiloissa bitumin materiaalikäyttäytyminen alkaa lähestyä kohti bitumin maksimijäykkyyttä, jossa bitumi on täysin elastista eli vaihekulma on nolla. Samanlainen vaihekulman lämpötilariippuvuus havaittiin alueen 1 näytteellä 1BA (kuva 62), joka oli alueen 2 näytteiden jälkeen tunkeuma- ja G^* -arvoiltaan kaikkein jäykin ennen Rem-toimenpidettä otettu näyte.

Alueella 4 (kuva 65) vastaavat erot vaihekulmissa ennen toimenpidettä otettujen näytteiden ja RTFOT-näytteiden välillä olivat suurempia kylmemmissä lämpötiloissa ja erot pienenivät lämpötilan kohotessa. Samanlainen käyrän käyttäytyminen havaittiin alueen 1 näytteellä 1AC (kuva 62). Koska alueen 4 näytteiden ja näytteen 1AC tunkeumat eivät olleet yhtä alhaisia kuin alueella 2 (ja näytteellä 1BA), saattaa pitkäaikaisvanhentumisessa tapahtuva vaihekulman lasku vaikuttaa aluksi voimakkaammin alemmissa lämpötiloissa ja vanhennuksen edetessä siirtyä voimakkaammin myös korkeampiin lämpötiloihin.

Alueella 3 (kuva 64) käyrän muoto oli päinvastainen alueeseen 4 verrattuna eli vaihekulmien erot (RTFOT-käyrään) olivat suurempia korkeissa lämpötiloissa kuin alhaisissa. Alemmissa mittaustemperatuureissa ($< 30^\circ\text{C}$) vaihekulmien arvot olivat jo melko lähellä RTFOT-arvoja, mutta lämpötilan ($> 30^\circ\text{C}$) yläpuolella käyrien muoto muuttuu selvästi ja vaihekulmien erot kasvoivat. Alueen 3 käyrien muoto eli lämpötilaherkkyys poikkeaa selvästi muista alueista. Tämä voi esimerkiksi johtua siitä, että alueen 3 bitumin alkuperäinen laatu on saattanut olla muista alueista poikkeava.

Koska vaihekulmia ei onnistuttu millään alueella nostamaan tavoiteltuihin RTFOT-näytteen arvoihin, elvyttämisen onnistumista vaihekulmilla arvioitiin myös vertaamalla alueittain ennen ja jälkeen Rem-toimenpidettä otettujen näytteiden arvoja keskenään. Jos toimenpiteen jälkeen otettujen näytteiden vaihekulmat ovat nousseet ennen toimenpidettä olevista, on Rem-toimenpiteen yhteydessä tehty elvyttäminen onnistunut parantamaan sideainebitumin viskoelastista suhdetta tavoiteltuun viskoosimpaan suuntaan. Vertailun tulokset olivat hyvin samansuuntaisia kompleksimoduulien tulosten kanssa.

Alueella 2 (kuva 63) elvytys onnistui nostamaan näytteiden (vihreät käyrät) vaihekulmia ennen toimenpidettä olevista (punaiset käyrät). Vaihekulmien nousu alkuperäisestä tapahtuu koko lämpötila-alueella, mutta palautuminen näyttäisi olevan suurinta mittauksen keskilämpötiloissa ($20\ldots 50^\circ\text{C}$). Vaikka Rem-toimenpiteen jälkeen otetut näytteet jäivät huomattavasti RTFOT-näytteen vaihekulmien tavoitteesta, voidaan Rem-toimenpidettä pitää silti kannattavana bitumin ominaisuuksien valossa, koska elvyttäminen onnistui nostamaan vanhentuneen bitumin vaihekulmia ennen toimenpidettä olevista.

Alueella 4 (kuva 65) elvytettyillä näytteillä (vihreät käyrät) vaihekulmat säilyivät alhaisissa lämpötiloissa entisinä, mutta korkeammissa lämpötiloissa ($> 20^\circ\text{C}$) vaihekulmat jäivät ennen toimenpidettä olevia vaihekulmia pienemmiksi eli Rem-toimenpiteen aikana tapahtuvan vanhenemisen vaikutus oli suurempi kuin elvyttämisen. Alueella 1 (kuva 62) elvyttämisen vaikutuksen arvioiminen moduuliarvojen tavoin oli haasteellista. Jos elvytettyjen näytteiden (vihreät käyrät) alkuperäiset ominaisuudet olivat lähempänä näytettä 1AC, on käyttäytyminen samanlaista kuin alueen 4 näytteillä eli vaihekulmat jäävät pienemmiksi. Jos taas ominaisuudet olivat lähempänä näytettä 1BA, käyttäytyminen on kuin alueella 2 eli vaihekulmat kasvavat koko lämpötila-alueella.

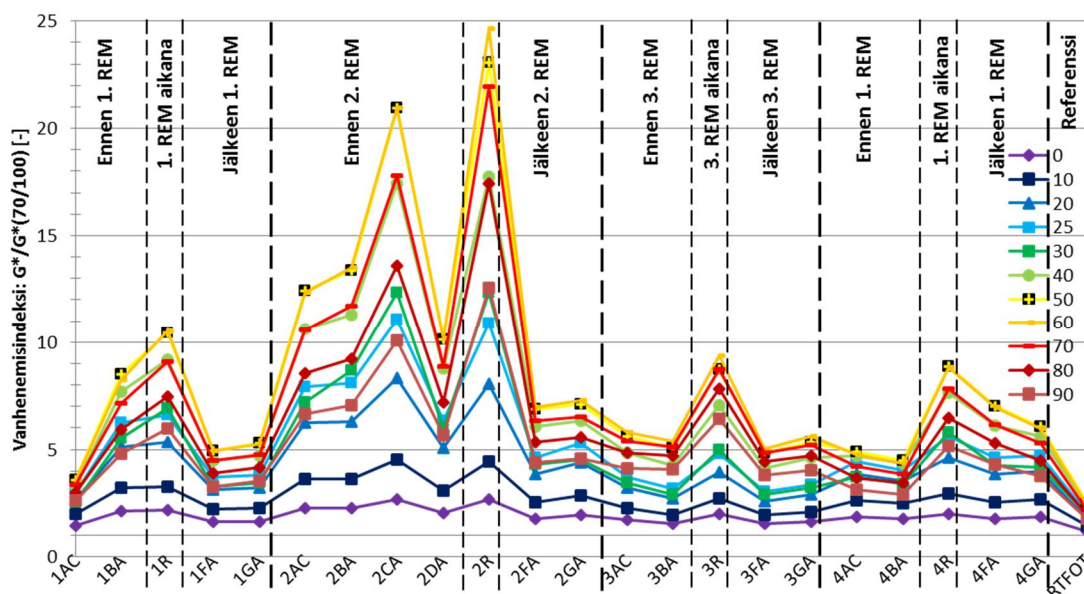
Alueella 3 (kuva 64) elvyttäminen onnistui vastaavasti kuin kompleksimoduuleissa vain palauttamaan vaihekulmat ennen toimenpidettä otettujen näytteiden vaihekulmiin eli vanhenemisen takia Rem-toimenpiteen yhteydessä tapahtuva elastisuuden kasvu (vaihekulman pieneminen)(3R) onnistuttiin elvytyksellä nostamaan takaisin ennen toimenpidettä olevaan elastisuuteen.

5.5 Vanhenemisindeksit

Bitumin vanhenemisessä tapahtuvia reologisten ominaisuuksien muutoksia kuvataan usein erilaisilla vanhenemisindekseillä, joiden tarkoituksena on esittää kuinka paljon materiaalin reologiset ominaisuudet ovat muuttuneet alkuperäisistä ominaisuuksista. Vertailtava referenssi-arvo voidaan valita tarkastelun mukaan myös muilla tavoilla. Indeksien hyötynä on, että ne antavat tulokseksi lukuarvon, kun esimerkiksi edellisen luvun isokronisissa kuvaajissa vanhenemistä arvioitiin vain käyrien eroina. Tässä tutkimuksessa vanhenemisindeksit on määritetty kompleksimoduuleille sekä vaihekulmille. Vanhenemisindeksit laskettiin kompleksimoduulille kaavalla

$$\text{Vanhenemisindeksi}_{G^*} = \frac{G^*_{\text{vanhentunut näyte}}}{G^*_{\text{referenssi}}}, \quad (28)$$

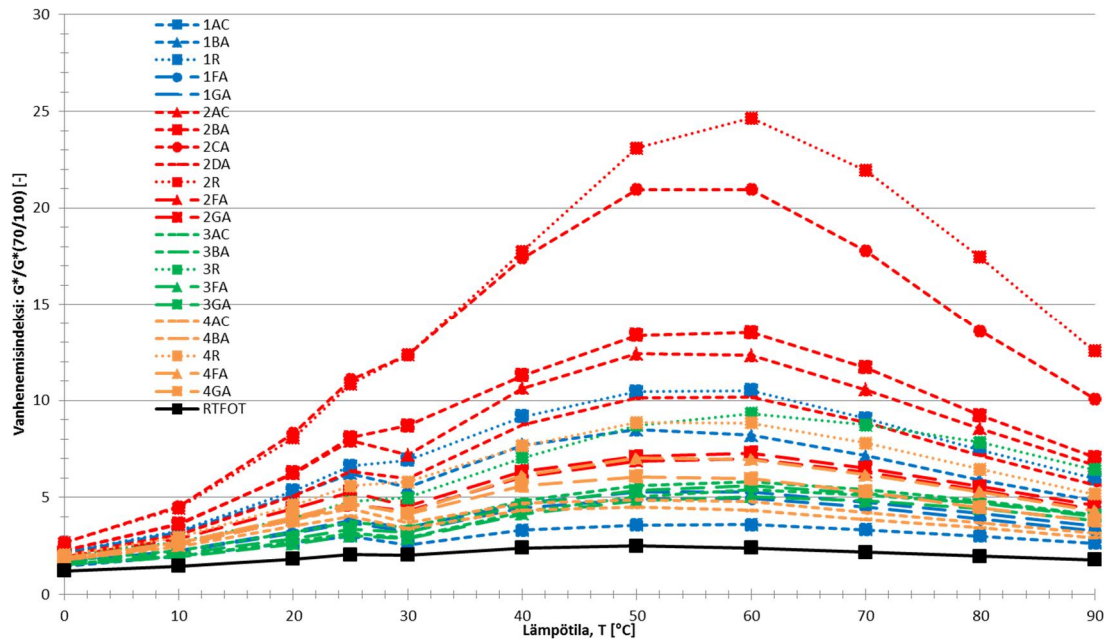
missä $G^*_{\text{vanhentunut näyte}}$ ja $G^*_{\text{referenssi}}$ ovat tutkittavan näytteen ja referenssibitumin kompleksimoduulit valitussa lämpötilassa ja kuormitustaajuudessa. Koska bitumi jäykkyys kasvaa (G^* -arvot kasvavat) vanhetessaan, mitä suurempi indeksin arvo on, sitä enemmän tutkittava bituminäyte on siis vanhentunut. Vanhenemisindeksin arvo riippuu kompleksimoduulin arvojen tapaan sekä lämpötilasta että kuormitustaajuudesta. Kuvis- sa 66...69 vanhenemisindeksejä on vertailtu eri mittauslämpötiloissa taajuudella 1,78 Hz. Kuvissa 66 ja 68 vertailu on tehty tutkittavien näytteiden välillä ja kuvissa 67 ja 69 lämpötilan suhteen. Vanhenemisindeksit on laskettu kahdella eri referenssillä, jotka ovat tuore referenssibitumi (näyte 70/100) sekä sen RTFOT-vanhennettu näyte (70/100-RTFOT). Laskettaessa vanhenemisindeksi tuoreen bitumin avulla (kuvat 66 ja 67), voidaan selvittää, kuinka paljon näytteet ovat kokonaisuudessaan vanhentuneet. Vastaavasti taas RTFOT-näytteen avulla laskettu vanhenemisindeksi (kuvat 68 ja 69) kuvaa kuinka paljon bituminäytteet ovat vanhentuneet tiellä käytön aikana (pitkäaikaisvanhentuminen). Liitteen F taulukossa F.1 on esitetty kaikkien näytteiden vanhenemisindeksien arvot taajuudella 1,78 Hz, kun referenssinä on tuore 70/100-bituminäyte.



Kuva 66. Vanhenemisindeksit tutkituille bituminäytteille eri mittauslämpötiloissa taajuudella 1,78 Hz. Vanhenemisindeksit on laskettu vertaamalla tuoretta referenssibitumia (70/100).

Kaikki näytteet ovat vanhentuneet, mikä näkyy vanhenemisindeksin arvoa 1 suurempina arvoina kaikissa lämpötiloissa. Rem-toimenpiteen aikana otetut näytteet (*R) saivat alueensa suurimmat vanhenemisindeksin arvot. Alueen 2 ennen Rem-toimenpidettä olevat vanhenemisindeksit ovat selvästi muita suurempia, mutta elvyttäminen (jälkeen 2. Rem) on onnistunut alentamaan indeksin arvoja selvästi. Alueella 3 vanhenemisindeksit eivät muuttuneet Rem-toimenpiteen välillä. Vastaavasti alueella 4 vanhenemisindeksit kasvoivat Rem-toimenpiteen yhteydessä, koska Rem-toimenpiteen jälkeen otettujen näytteiden indeksiarvot ovat kasvaneeet. Tulokset ovat jälleen yhteneviä aikaisempien tulosten kanssa.

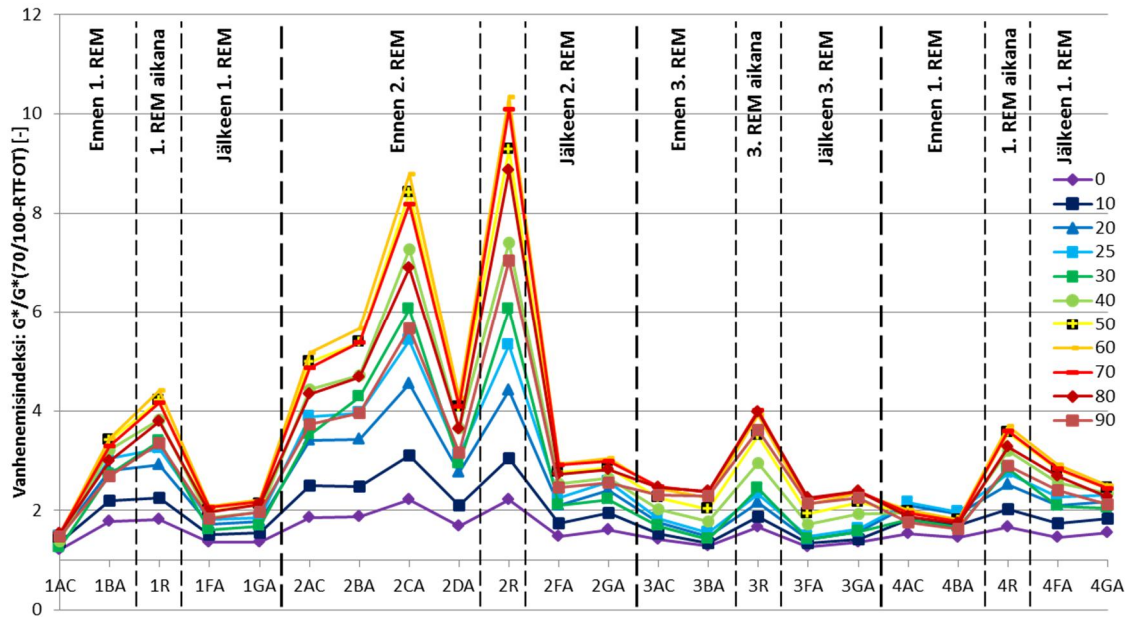
Lämpötila vaikuttaa selvästi vanhenemisindeksin arvoon, joka voidaan havaita vielä selvemmin kuvasta 67, jossa käyrät kuvaavat näytteiden indeksin muutoksia lämpötilan suhteen. Näyttäisi siltä, että mitä vanhentuneempi näyte on, sitä suuremmat erot vanhenemisindeksin arvoissa on eri lämpötiloissa. Pienimmät indeksin arvot saatiin kylmimmissä mittauslämpötiloissa eli vanheneminen on suhteellisesti pienintä alhaisimissa lämpötiloissa, kun vanhenemisen kriteerinä pidetään jäykkyyden suhteellista kasvua. Kun lämpötila nousee, kasvaa myös indeksin arvo. Kaikilla näytteillä vanhentuminen on voimakkainta lämpötiloissa 50 ja 60 °C, kun vanhenemistä verrataan tuoreen 70/100-bitumin arvoihin. Tätä korkeammissa lämpötiloissa indeksin arvo lähtee taas laskemaan.



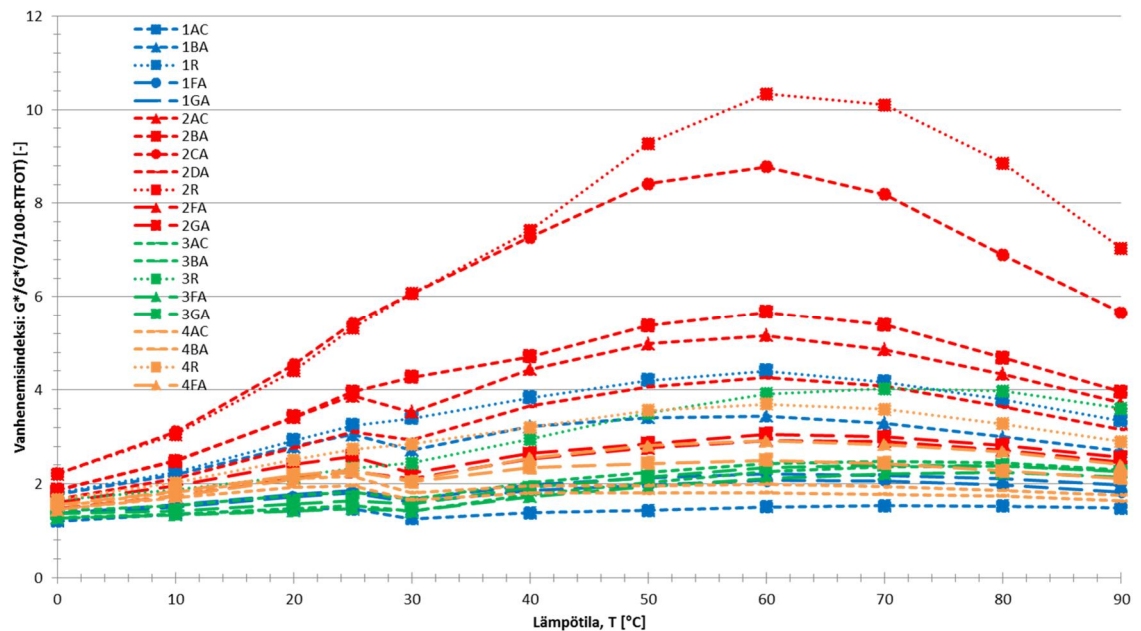
Kuva 67. Lämpötilan vaikutus vanhenemisindeksien arvoihin tutkituilla bituminäytteillä taajuudella 1,78 Hz. Vanhenemisindeksit on laskettu vertaamalla tuotetta referenssibitumia (70/100).

Kuvissa 68 ja 69 vanhenemisindeksit on laskettu käyttäen RTFOT-vanhennetun bitumin arvoja referensseinä. Tällä tavalla voidaan arvioida, miten bitumi on vanhentunut tiellä sen käyttöaikana. Koska kaikkien näytteiden vanhenemisindeksit ovat suurempia kuin yksi, on bitumin vanheneminen jatkunut myös käytön aikana eikä elvyttäminen ole onnistunut palauttamaan (jälkeen Rem-toimenpiteen otetut näytteet) vanhenemisestä johtuvaa bitumin jäykkyyden kasvua. Muutokset vanhenemisindeksien arvoissa alueiden ja Rem-toimenpiteen välillä ovat täysin vastaavia kuin kuvassa 66. Arvot ovat vain pienempiä, koska RTFOT-arvoon verrattaessa, tuloksista on poistettu asfalttimassan valmistuksessa tapahtuva bitumin vanheneminen.

Erot vanhenemisindeksien arvoissa voidaan havaita myös lämpötilan suhteen. Kun vanhenemistä verrataan RTFOT-vanhennettuun näytteeseen, on vanhentuminen voimakkainta hieman korkeammissa lämpötiloissa (60...70 °C). Tämä voidaan havaita kuvasta 68, jossa suurimmat vanhenemisindeksin arvot useimmilla näytteillä saadaan lämpötiläkäyrällä 60 tai 70 °C. Alueella 3 vanheneminen oli voimakkainta vieläkin korkeammassa lämpötiloissa (70...80 °C). Näihin tuloksiin saattaa vaikuttaa, että alueen 3 alkupeäinen bitumilaatu saattoi poiketa muiden alueiden bitumeista. Muista näytteistä poikkeava käyttäytyminen saadaan myös alueella 4 ennen Rem-toimenpidettä, sillä näillä näytteillä vanheneminen on voimakkainta lämpötilassa 25 °C, mutta toisaalta tällä alueella vanhenemisindeksit olivat kaikkiaan pieniä.



Kuva 68. Vanhenemisindeksit tutkituille bituminäytteille eri mittauslämpötiloissa taajuudella 1,78 Hz. Vanhenemisindeksit on laskettu vertaamalla RTFOT-vanhennettua referenssibitumia (70/100-RTFOT).



Kuva 69. Lämpötilan vaikutus vanhenemisindeksien arvoihin tutkituilla bituminäytteillä taajuudella 1,78 Hz. Vanhenemisindeksit on laskettu vertaamalla RTFOT-vanhennettua referenssibitumia (70/100-RTFOT).

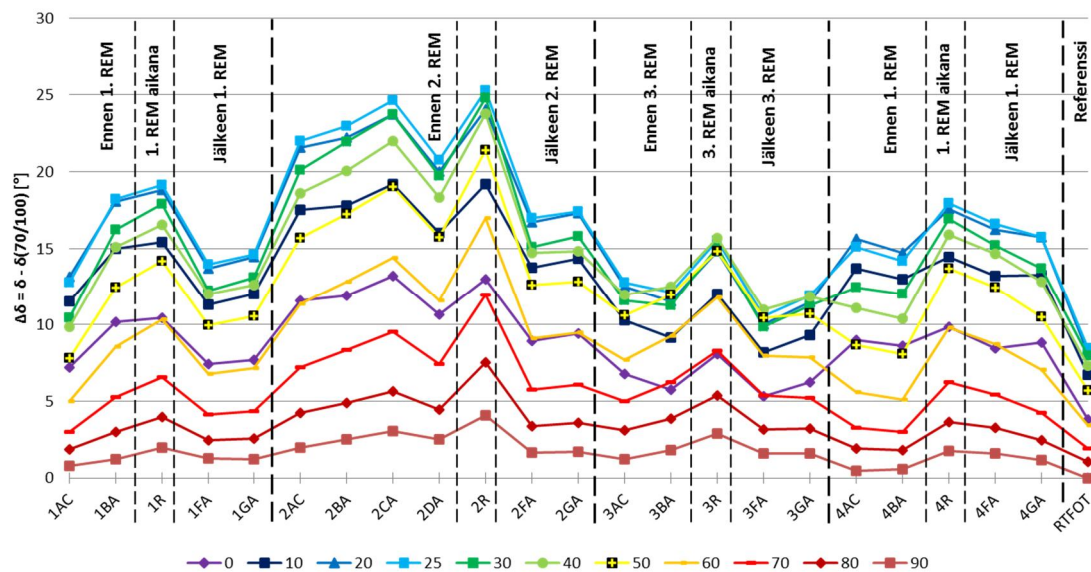
Bitumin vanhenemista voidaan tutkia myös vertaamalla vaihekulmassa tapahtuvaa muutosta vanhenemisen yhteydessä kaavalla

$$\Delta\delta = \delta_{\text{referenssi}} - \delta_{\text{vanhentunut näyte}}, \quad (29)$$

missä $\delta_{\text{vanhentunut näyte}}$ ja $\delta_{\text{referenssi}}$ ovat tutkittavan näytteen ja referenssibitumin vaihekulmat valitussa lämpötilassa ja kuormitustaajuudessa. Koska myös bitumin elastisuus kasvaa (δ -arvot pienenevät), kun se vanhenee, mitä suurempi $\Delta\delta$ -arvo on, sitä enemmän tutkittava bituminäyte on vanhentunut. $\Delta\delta$ -arvo riippuu myös sekä lämpötilasta että kuormitustaajuudesta. Kuvissa 70...73 $\Delta\delta$ -arvoja on vertailtu eri mittauslämpötiloissa

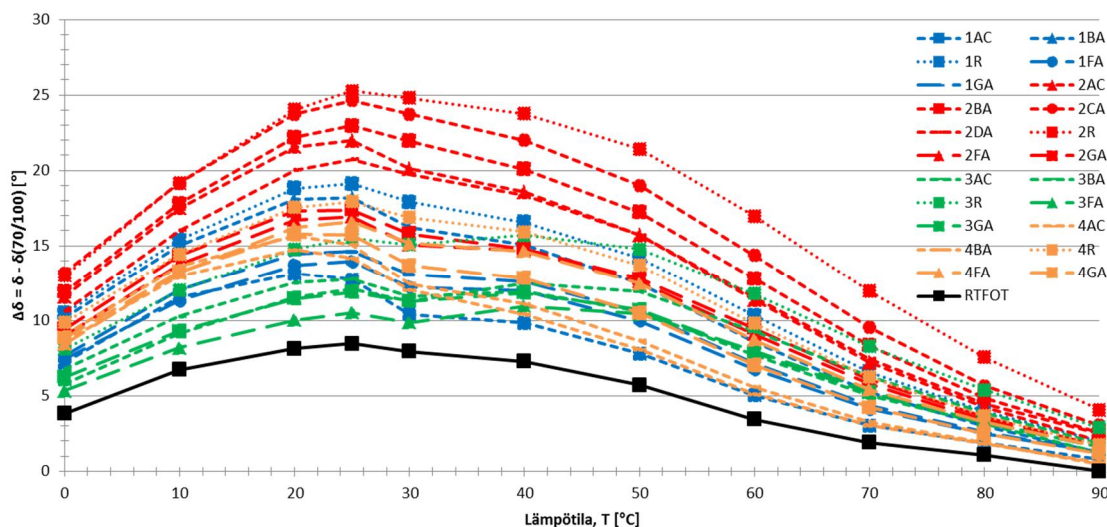
taajuudella 1,78 Hz. Liitteen F taulukossa F.2 on esitetty kaikkien näytteiden $\Delta\delta$ -arvot taajuudella 1,78 Hz, kun referenssinä on tuore 70/100-bituminäyte.

Kuvissa 70 ja 71 $\Delta\delta$ -arvot on laskettu käyttäen referenssinä tuoretta bitumia (70/100). Tuloksista on hyvin nähtävissä, että kaikkien tutkittavien näytteiden vaihekulmat olivat kaikissa mittauslämpötiloissa pienempiä kuin tuoreen bitumin eli näytteet ovat vanhentuneita ja niistä on tullut elastisempia. Elastisuuden muutokset ($\Delta\delta$ -arvot) käyttäytyvät yhtenevästi jäykkyyden muutosten (vanhenemisindeksin arvot) kanssa eli, kun bitumi vanhenee, se muuttuu järemmäksi (G^* -arvo kasvaa \rightarrow vanhenemisindeksi kasvaa) ja samalla elastisemmaksi (δ -arvo pienenee \rightarrow $\Delta\delta$ -arvo kasvaa). Materiaaliominaisuuksien yhtenevyys voidaan havaita vertaamalla kuvien 66 ja 70 käyrien samanlaista vaihtelua eri näytteiden välillä.



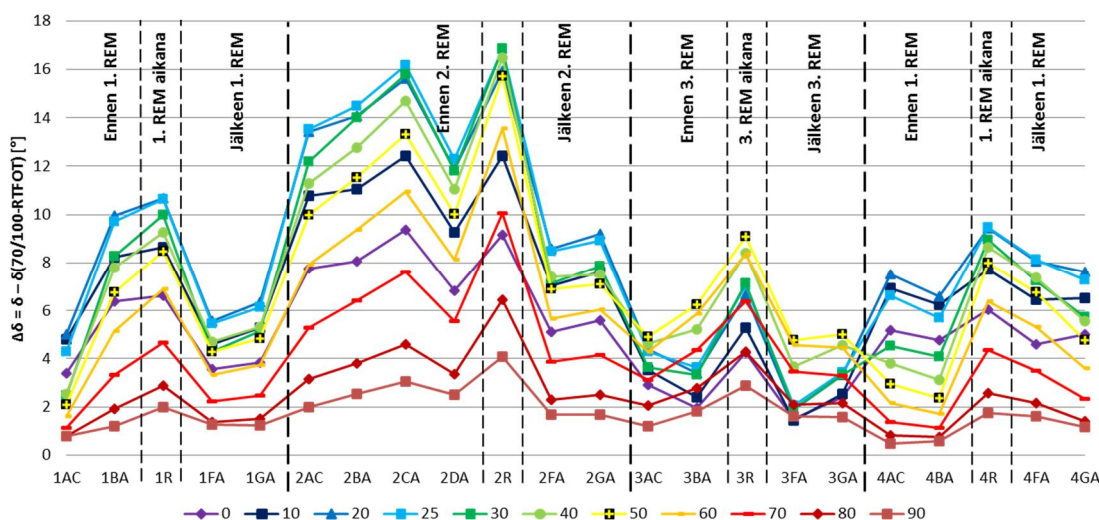
Kuva 70. $\Delta\delta$ -arvot tutkituille bituminäytteille eri mittauslämpötiloissa taajuudella 1,78 Hz. Vanhenemisindeksit on laskettu vertaamalla tuoretta referenssibitumia (70/100).

Myös $\Delta\delta$ -arvojen suuruuteen vaikuttaa merkittävästi lämpötila, joka voidaan havaita sekä kuvasta 70 että 71. Pienimmät $\Delta\delta$ -arvot saadaan korkeimmissa mittauslämpötiloissa, joissa kaikkien näytteiden materiaalikäyttäytyminen on jo lähellä täysin viskoosia, jolloin vaihekulma nousee arvoon 90 °. Kun lämpötila laskee, kasvavat $\Delta\delta$ -arvot aina lämpötiloihin 20...30 °C asti, jossa $\Delta\delta$ -arvot ovat lähes kaikilla näytteillä suurimmillaan. Tämä tarkoittaa, että jos bitumin vanhentumista arvioidaan vaihekulmien pienentymisellä (elastisuuden kasvulla), ovat muutokset suurimmillaan noin lämpötilassa 25 °C. Kun lämpötila vielä laskee, alkavat $\Delta\delta$ -arvot pienentyä.



Kuva 71. Lämpötilan vaikutus $\Delta\delta$ -arvoihin tutkituilla bituminäytteillä taajuudella 1,78 Hz. Vanhenemisindeksit on laskettu vertaamalla tuoretta referenssibitumia (70/100).

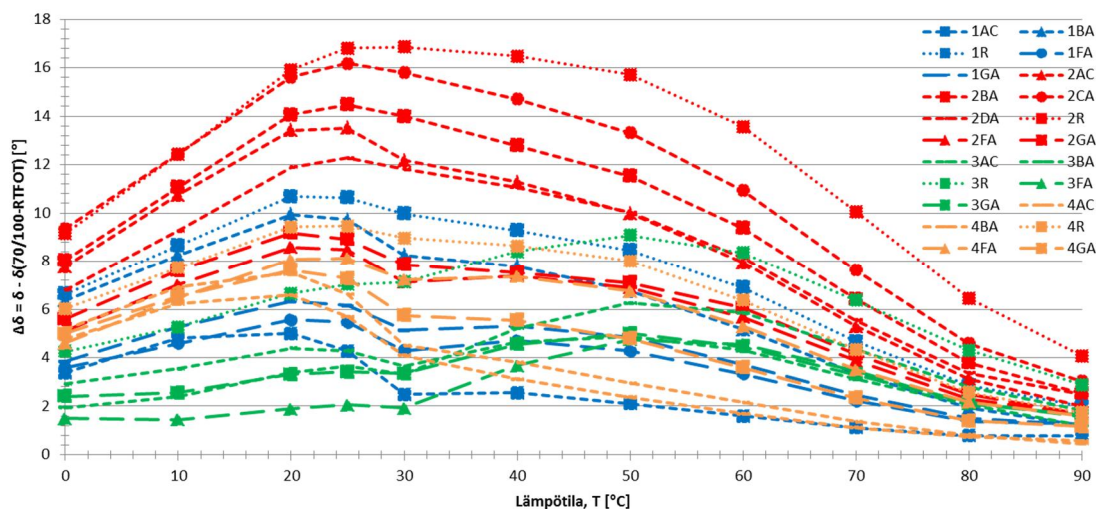
Kuvissa 72 ja 73 $\Delta\delta$ -arvot on laskettu käyttäen referenssinä RTFOT-vanhennettua bitumia (70/100-RTFOT). Tällä vertailulla voidaan arvioida, kuinka paljon bitumi muuttuu vielä elastisemmaksi tien käyttöaikana sekä kuinka hyvin elvyttäminen onnistuu palauttamaan Rem-toimenpiteen jälkeen otettujen näytteiden vaihekulmia tavoiteltuihin RTFOT-arvoihin. Kuvasta 72 on nähtävissä, että vaihekulmat jäävät kaikissa lämpötiloissa tavoitelluista RTFOT-arvoista, koska $\Delta\delta$ -arvot ovat kaikkialla positiivisia.



Kuva 72. $\Delta\delta$ -arvot tutkituille bituminäytteille eri mittauslämpötiloissa taajuudella 1,78 Hz. Vanhenemisindeksit on laskettu vertaamalla RTFOT-vanhennettua referenssibitumia (70/100-RTFOT).

Vertaamalla elastisuuden kasvua RTFOT-vanhennettuun näytteeseen (kuvat 72 ja 73), $\Delta\delta$ -arvojen lämpötilaherkkyys pysyi muilla alueilla paitsi alueella 3 samanlaisena kuin vertaamalla tuoreeseen 70/100-näytteeseen (kuvat 70 ja 71). Suurimmat vaihekulmien muutokset saatiin siis noin lämpötilassa 25 °C. Alueella 3 vielä tuoreeseen bitumiin verrattaessa, $\Delta\delta$ -arvot käyttäytyivät eri lämpötiloissa melko samalla tavalla kuin muilla alueilla, mutta verrattaessa arvoja RTFOT-arvoihin, poikkesi lämpötilaherkkyys selvästi muista alueista. Alueella 3 näytteiden suurimmat elastisuuden kasvut ($\Delta\delta$ -arvot) saavutettiin, kun mittauslämpötila oli 40...60 °C. Tällainen muiden alueiden näytteistä poik-

keava materiaalikäyttäytyminen havaittiin jo luvussa 5.4 ja on todennäköistä, että alueen 3 alkuperäisen asfalttimassan sideaineena käytettiin erilaista bitumilaatua kuin muilla alueilla. Tällöin myös asfalttimassan valmistuksessa tapahtuva bitumin vanheneminen saattaa poiketa tässä tutkimuksessa käytettävästä RTFOT-näytteen käyttäytymisestä, jolloin näihin arvoihin vertaaminen saattaa tuottaa virheellisiä päätelmiä.



Kuva 73. Lämpötilan vaikutus $\Delta\delta$ -arvoihin tutkituilla bituminäytteillä taajuudella 1,78 Hz. Vanhenemisindeksit on laskettu vertaamalla RTFOT-vanhennettua referenssibitumia (70/100-RTFOT).

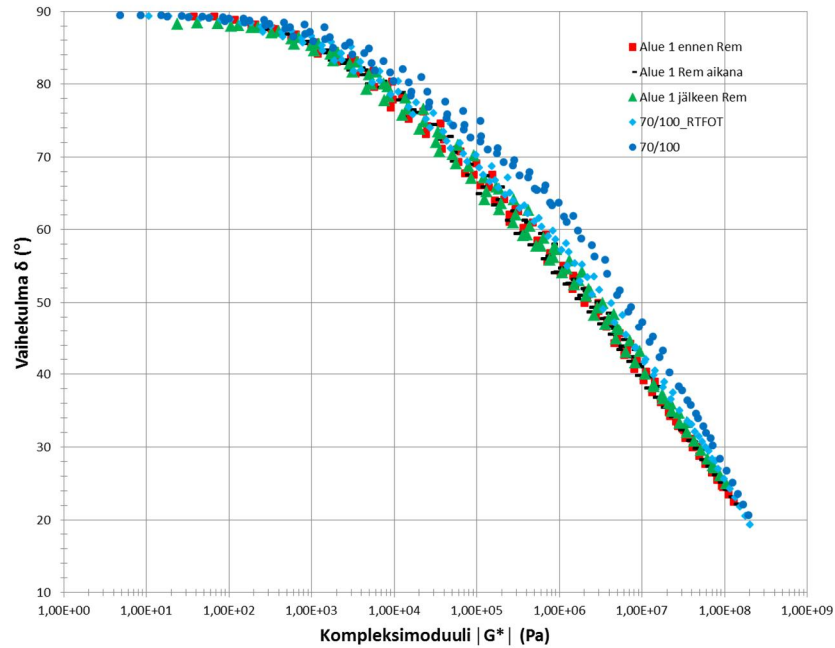
5.6 Jäykkyys-elastisuus-suhteen muutos

Bitumin reologista käyttäytymistä kuvataan usein Black diagrammissa, jonka avulla voidaan arvioida materiaalin jäykkyyden (G^*) ja elastisuuden (δ) suhdetta. Taajuuspyyhkäisyssä mitattuja tuloksia arvioitiin Black diagrammien avulla. Kuvissa 74...77 Black diagrammit on esitetty alueittain. Jokaiselta alueelta on valittu yksi ennen Rem-toimenpidettä otettu näyte (*BA, punainen), yksi Rem-toimenpiteen jälkeen otettu näyte (*FA, vihreä) sekä Rem-toimenpiteen aikana otettu näyte (*R, musta). Kuvissa on myös referenssibitumin (70/100, sininen) sekä sen RTFOT-vanhennetun näytteen (70/100-RTFOT, vaalean sininen) Black diagrammit. Kuvien Black diagrammeista on jätetty pois taajuuspyyhkäisyn alimmat ja korkeimmat taajuudet, koska osalla näytteistä nämä mittauksen ääritajuudet aiheuttivat jo virheellisiä tuloksia.

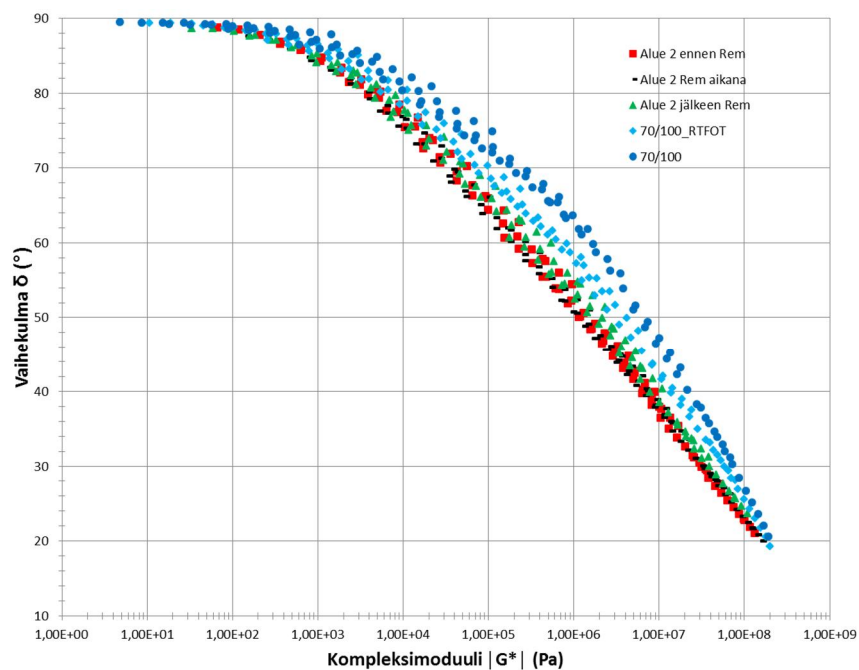
Kun bitumi vanhenee, sen jäykkyys ja elastisuus kasvavat, mikä näkyy kompleksimoduulin kasvuna ja vaihekulman laskuna. Kun tuore bitumi alkaa vanhenta, muuttuu myös bitumin jäykkyyden ja elastisuuden suhde, mikä voidaan havaita muutoksissa Black diagrammissa. Jokaisesta kuvasta (74...77) on nähtävissä, kuinka jo pelkkä RTFOT-vanhennus aiheuttaa bitumin käyrän siirtymistä pienempiin vaihekulmiin verrattuna tuoreeseen bitumiin. Vastaavalla jäykkyydellä siis vanhentunut bitumi on muuttunut elastisemmaksi. Muut käyrät kuvaavat, miten tiellä vanheneminen on muuttanut Black diagrammien muotoa sekä miten Rem-toimenpiteen eri vaiheet vaikuttavat diagrammin muotoon.

Alueella 2 tienäytteiden Black diagrammit eroavat eniten referenssibitumien 70/100 ja 70/100-RTFOT diagrammeista. Kuvasta 75 nähdään selvästi, että alueella 2 bitumin vanheneminen tiellä on aiheuttanut vastaavalla tavalla kuin RTFOT-vanhennus tuoreelle bitumille Black diagrammissa bitumin käyrän siirtymistä entistä alhaisempiin vaihekulmiin. Muilla alueilla vanhentumisessa syntyvät erot eivät ole yhtä selvästi erotetta-

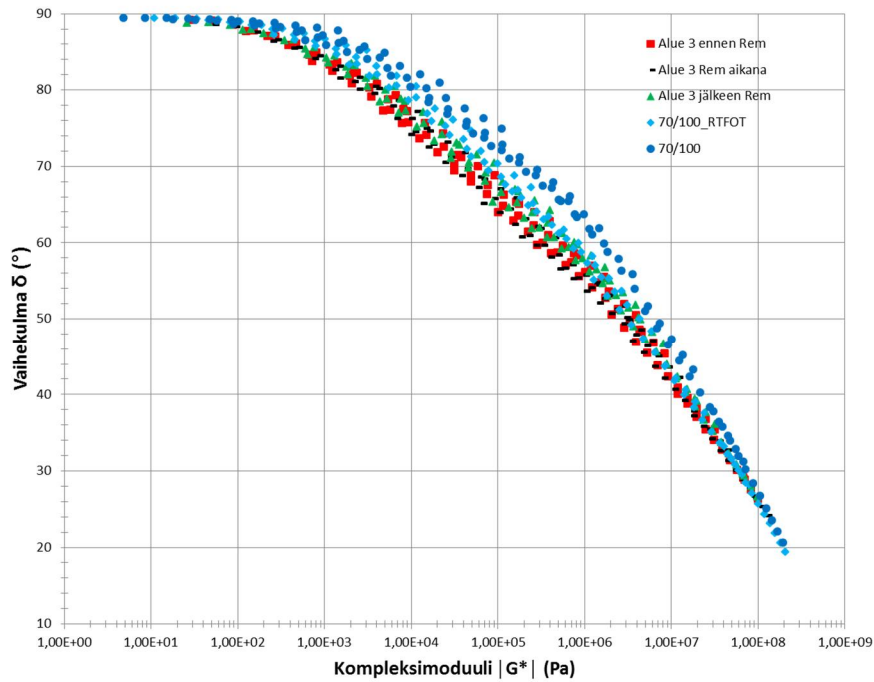
vissa. Alueilla 1 ja 4 (kuvat 74 ja 77) muutokset ovat samansuuntaisia, mutta pienempiä, minkä voidaan ajatella johtuvan pienemmästä vanhenemisen asteesta, sillä alueilla 1 ja 4 Rem-toimenpide oli vasta ensimmäinen, kun se alueella 2 oli jo toinen. Alueella 3 (kuva 76) tiellä vanhentuneiden näytteiden Black diagrammien ovat yhteneviä RTFOT-käyrän kanssa suurilla G^* -arvoilla (ja vastaavasti pienillä δ -arvoilla), mutta erkanevat toisistaan G^* -arvojen pienentyessä niin, että alueen 3 näytteet muuttuvat elastisemmiksi. Tämä saattaa taas olla osoitus, että alueen 3 alkuperäinen bitumilaatu poikkeaa muista, jolloin tulosten vertaaminen tässä tutkimuksessa käytettyihin referensseihin ei välttämättä ole täysin luotettavaa.



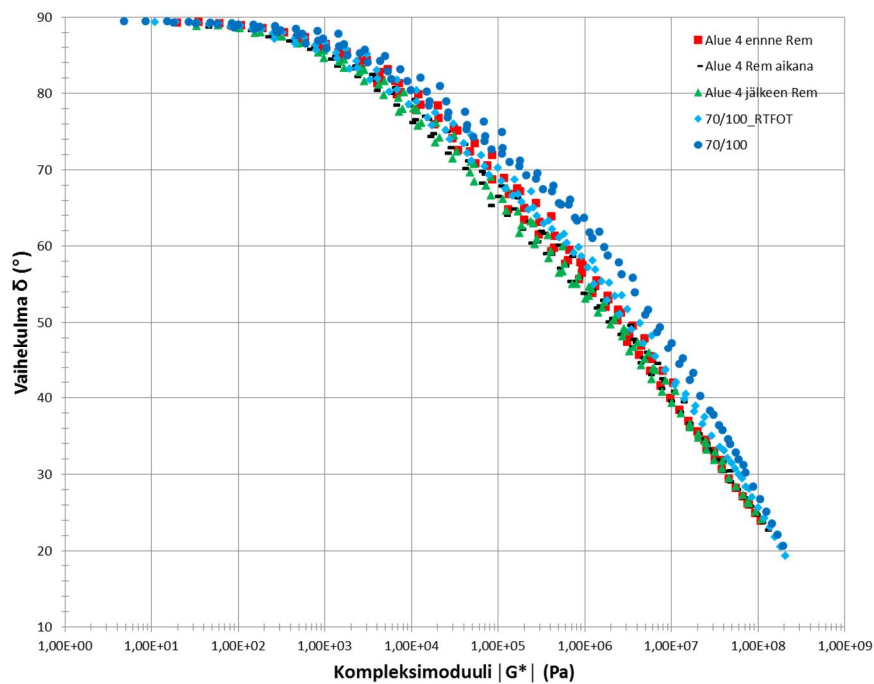
Kuva 74. Alueen 1 Black diagrammit



Kuva 75. Alueen 2 Black diagrammit



Kuva 76. Alueen 3 Black diagrammit

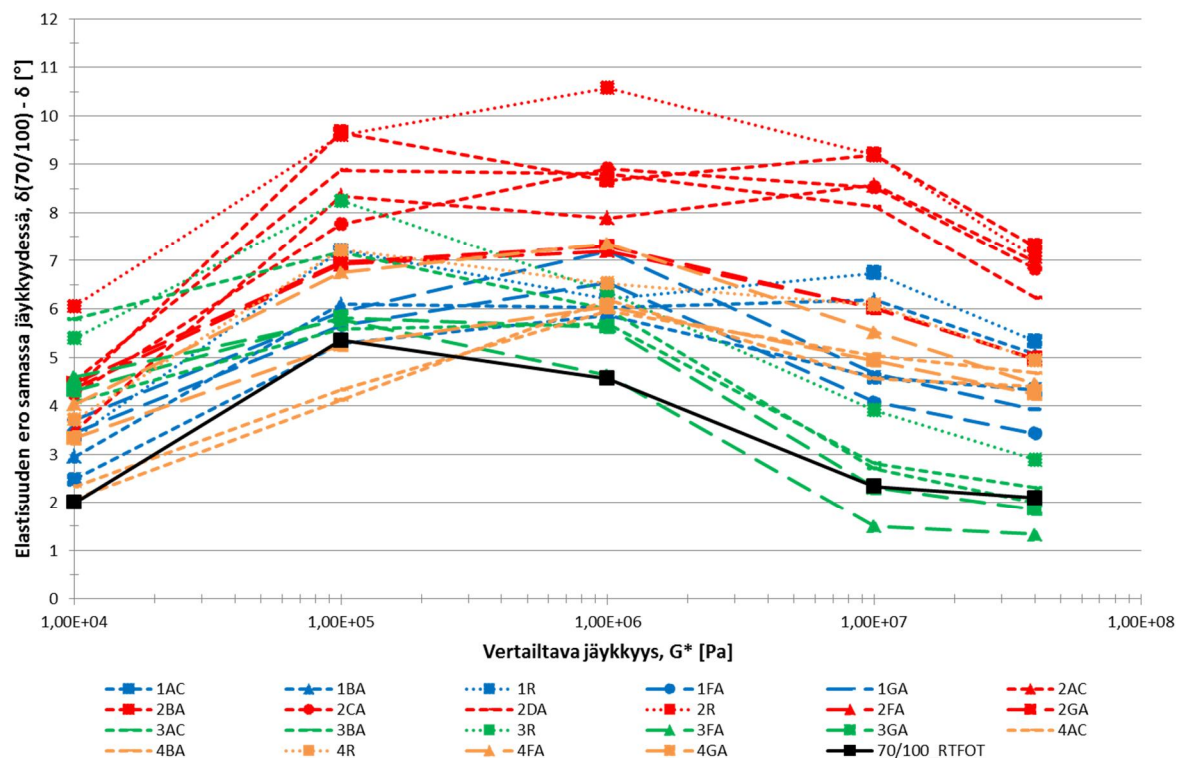


Kuva 77. Alueen 4 Black diagrammit

Kaikkien kuvien perusteella voidaan sanoa, että Rem-toimenpiteen eri vaiheista otetut näytteet (ennen, aikana ja jälkeen) muodostavat melko yhtenevät Black diagrammit kaikilla alueilla. Kaikilla alueilla bitumin on tutkimuksessa jo todettu vielä vanhenevan Rem-toimenpiteen aikana, mikä on havaittu tunkeuman ja vaihekulmien laskuna sekä kompleksimoduulin suurenemisena näytteillä *R. Myös elvyttämisen vaikutusten on jo todettu kasvattavan tunkeumia ja vaihekulmia sekä pienentävän kompleksimoduuleja, jos elvytys on onnistunut. Nämä jo havaitut muutokset eivät kuitenkaan näytä vaikuttavan enää vaihekulmien ja kompleksimoduulien suhteeseen eli vaihekulmien ja kompleksimoduulien muutokset Rem-toimenpiteen eri vaiheissa liikkuvat suunnilleen samalla Black diagrammin käyrällä. Se, ettei elvyttäminen muuta Black diagrammin muotoa

johtuu todennäköisesti elvyttimen kyvystä ainoastaan pehmentää bitumia. Elvyttimen aiheuttama pehennys (jäykkyyden pieneneminen) aiheuttaa samalla myös elastisuuden pienenemisen, mutta vain vanhennuksessa muuttuneen bitumin jäykkyys-elastisuuden puitteissa. Tämä on todennäköistä, koska bitumin vanheneminen on suurimmaksi osaksi hapettumista, jossa bitumin kemialliset ominaisuudet muuttuvat, eikä mekaaninen elvyttimen ja bitumin sekoittuminen pysty luonnollisestikaan muuttamaan tällaisia ominaisuuksia. Toisaalta, koska elvytinnäärät olivat suhteessa koko bitumimäärän niin pieniä, saattaa olla, etteivät muutokset Black diagrammissa tämän takia näy.

Black diagrammissa havaittavia ominaisuuden muutoksia voidaan tutkia myös vertaamalla näytteiden vaihekulmia samassa jäykkyydessä tuoreeseen 70/100-referenssibitumiin. Kuvassa 78 vaihekulmien eroja on vertailtu viidellä eri kompleksimoduulin (jäykkyyden) arvolla. Vertailu laskettiin interpoloimalla lineaarisella regressiomallilla taajuudella 1,78 Hz olevasta taajuuspyyhkäisydatasta. Lasketut vaihekulmien erot on esitetty myös liitteen G taulukossa. Kuvasta voidaan havaita samat asiat kuin Black diagrammeista. Kaikkien näytteiden elastisuus tietyssä jäykkyydessä on kasvanut ja alueiden (alueet eroteltu eri väreillä) sisällä erot pysyvät melko pieninä vertailtavilla jäykkyyksillä ja alueilla, ero on 1...3,5 °. Alueen 2 elastisuus on kasvanut eniten.



Kuva 78. Näytteiden vaihekulmien ero samassa jäykkyydessä (G^* -arvot samat) verrattuna tuoreeseen referenssibitumiin 70/100.

6 Taajuuspyyhkäisymittausten jatkotarkastelu

6.1 G-R-parametri

Kuten luvussa 2.3.2 käytiin jo läpi, bitumin vanhenemisesta johtuvia väsymiskestävyyden muutoksia voidaan arvioida G-R-parametrin avulla. Päällysteen väsymisvaurioiden (päällysteen halkeilu ja purkautuminen) on useiden kenttätutkimusten perusteella havaittu korreloivan melko hyvin bitumin venymätestin kanssa. G-R-parametrille on kehitetty venymätestitulosten ja parametrin välisen korrelaation perusteella väsymiskestävyyden vauriorajat, joiden avulla bitumin vanhenemista voidaan tutkia. Etuna G-R-parametrissa on, että reometrillä saatavia mittaustuloksia voidaan verrata konkreettiseen, päällysteen kestävyteen yhdistettyyn raja-arvoon.

G-R-parametri on määritelty reometrillä mitattujen kompleksimoduulin (G^*) ja vaihekulman (δ) avulla kaavalla

$$G - R - parametri = \frac{G^*(\cos \delta)^2}{\sin \delta} * \omega. \quad (30)$$

G-R-parametrin avulla lasketut raja-arvot on määritetty kulmataajuudella $\omega = 0,005 \text{ rad/s}$ ja lämpötilassa $T = 15^\circ\text{C}$, jotka vastaavat venymätestin mittausoaloja. Tässä tutkimuksessa reologiset parametrit (G^* ja δ) määritettiin taajuuspyyhkäisymittauksissa, mutta koska mittauksia ei tehty näin alhaisilla kulmataajuuksilla juuri tässä lämpötilassa, pitää parametrin määrittämisessä käyttää aika-lämpötila-superpositioperiaatetta (TTS-periaate).

Kaikille tutkimuksen näytteille tehtiin taajuuspyyhkäisydatasta TTS-periaatetta käyttäen Master-käyrät (kts. luvut 2.2.4 ja 4.2). Master-käyrät tehtiin mittaustilanteen $T_{ref} = 20^\circ\text{C}$ suhteen, joiden mukaan siirtokertoimetkin määritettiin. Kaavassa 19 (kts. 2.2.4) aika-lämpötila-superpositioperiaate on määritelty taajuudella moduuliarvoille, mutta se voidaan laskea yhtä hyvin myös kulmataajuudella kompleksimoduulille ja vaihekulmalle kaaviolla 31 ja 32.

$$G^*(\omega, T) = G^*(a_T(T) * \omega, T_{ref}) \quad (31)$$

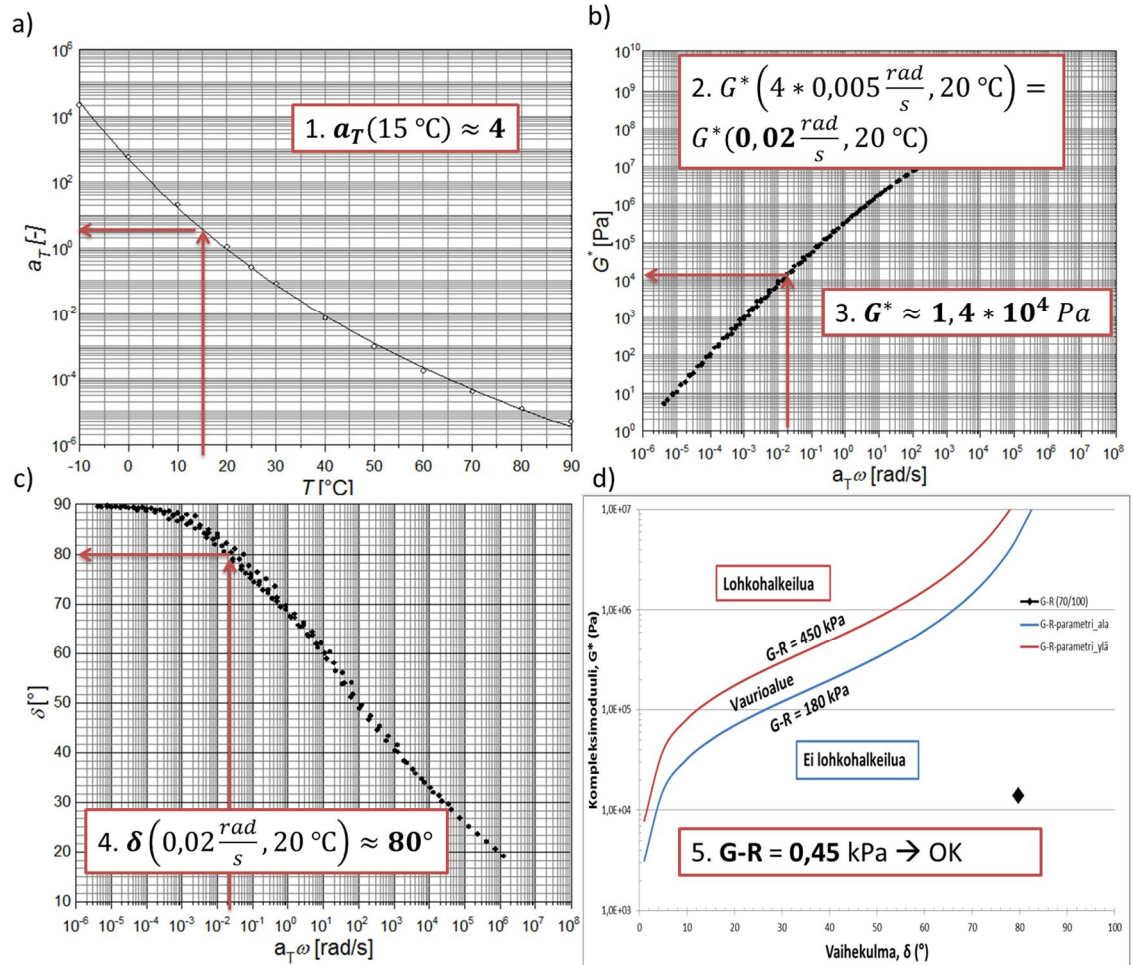
$$\delta(\omega, T) = \delta(a_T(T) * \omega, T_{ref}) \quad (32)$$

Koska G-R-parametri lasketaan siis kulmataajuudella $\omega = 0,005 \text{ rad/s}$ ja lämpötilassa $T = 15^\circ\text{C}$ ja tutkimuksen bitumeille master-käyrät on tehty lämpötilassa $T_{ref} = 20^\circ\text{C}$, saadaan kaavat 31 ja 32 muotoon

$$G^*\left(0,005 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, 15^\circ\text{C}\right) = G^*\left(a_T(15^\circ\text{C}) * 0,005 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, 20^\circ\text{C}\right) \quad (33)$$

$$\delta\left(0,005 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, 15^\circ\text{C}\right) = \delta\left(a_T(15^\circ\text{C}) * 0,005 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, 20^\circ\text{C}\right). \quad (34)$$

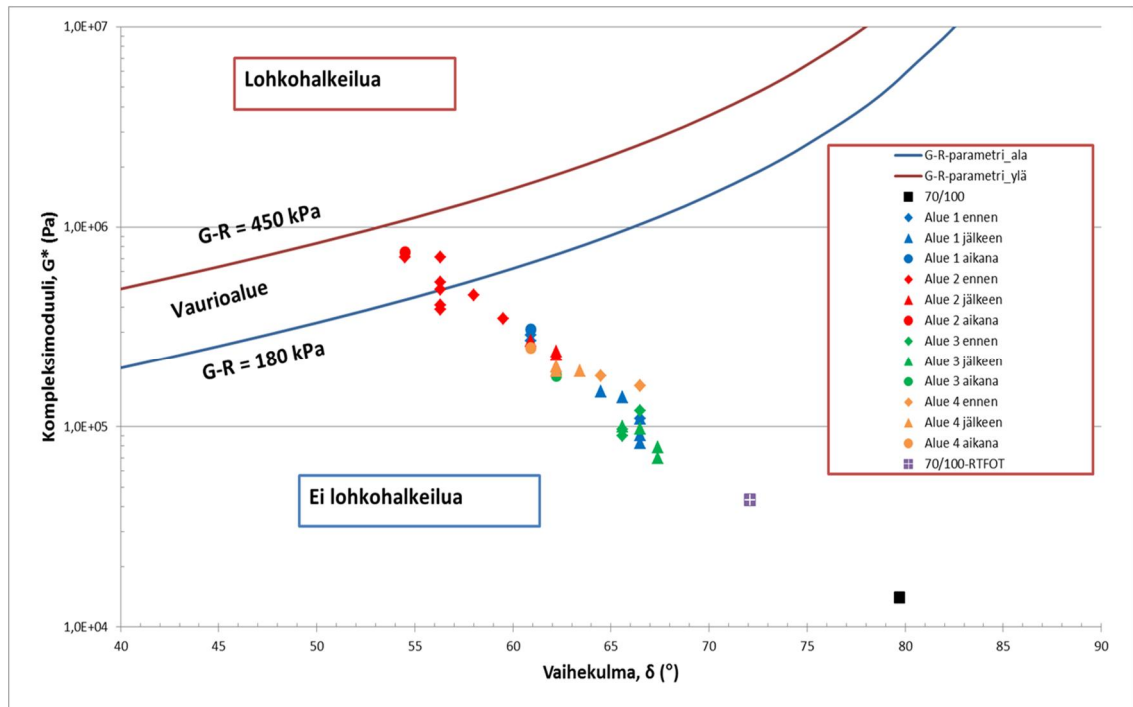
Reologisten parametrien (G^* ja δ) arvot halutussa pisteessä ($0,005 \text{ rad/s}$, 15°C) voidaan määrittää siis myös master-käyrien referenssilämpötilassa 20°C , kun kulmataajuutena käytetään siirtokertoimella a_T muutettua arvoa, joka on näytteelle ominainen ja riippuu vain lämpötilasta. Tässä tapauksessa siirtokertoimen arvo määritetään lämpötilassa $T = 15^\circ\text{C}$. Esimerkki G-R-parametrin määrittämisestä taajuuspyyhkäisydatasta tehtyjen Master-käyrien avulla on esitetty kuvan 79 kohdissa a)...d). Kuvan esimerkkinä määrittäminen tehtiin referenssibitumille (70/100).



Kuva 79. G-R-parametrin määrittäminen bitumille 70/100 Master-käyrien avulla.

Ensimmäiseksi siirtokertoimen arvo määritettiin halutussa lämpötilassa ($T = 15$ °C) siirtokertoimen kuvaajasta (kohta a). Tämän jälkeen tätä siirtokerrointa käyttämällä määritettiin kulmataajuus, jolla kompleksimoduulin (kohta b) ja vaihekulman (kohta c) arvot määritettiin niiden Master-käyristä referenssilämpötilassa 20 °C. Näin saatujen kompleksimoduulin ja vaihekulman arvot esitettiin Black diagrammissa yhdessä G-R-parametrin vauriorajojen käyrien kanssa (kohta d). Samalla kompleksimoduulin ja vaihekulman avulla laskettiin G-R-parametri. Kohdan d) Black diagrammista sekä G-R-parametrin arvosta havaitaan, että tuore bitumi 70/100 on kaukana vauriorajoista, mikä oli tuoreelle bitumille varsin oletettua. Kaikille näytteille määritettiin G-R-parametri vastaavalla tavalla käyttäen kunkin näytteen omia Master- ja siirtokerroinkäyriä. Siirtokertoimet, kompleksimoduulit, vaihekulmat ja näiden avulla lasketut G-R-parametrin arvot on esitetty liitteen H taulukossa.

Kuvassa 80 on esitetty kaikkien näytteiden G-R-parametrien arvot vaihekulman ja kompleksimoduulin avulla Black diagrammissa. Black diagrammissa on esitetty myös parametrille määritetyt vauriorajat. Alempi käyrä ($G-R = 180$ kPa, vastaa venymätestin venymää 5 cm) kuvaa G-R-arvon rajaa, jossa bitumin vanhenemisen takia tapahtuvat päällysteen väsymisvauriot voivat alkaa ja ylempi käyrä ($G-R = 450$ kPa, vastaa venymätestin venymää 3 cm) rajaa, jossa vanhenemisen takia tapahtuva päällysteen halkeilu on jo todennäköistä. Kuvassa esitetyt arvot on jaoteltu alueiden mukaan eri väreihin ja Rem-toimenpiteen vaiheen mukaan eri symboleihin. Kaikki mittaukselliset tulokset on esitetty myös liitteen H taulukossa.



Kuva 80. G-R-parametrien arvot Black diagrammin tasossa sekä G-R-parametrille määritetyt vauriorajat.

G-R-parametrin mukaan alueen 2 näytteet olivat vanhentuneet eniten, mikä jälleen tukee muita tuloksia. Alueella 2 osa ennen Rem-toimenpidettä otetuista näytteistä (punainen ruutu) sekä Rem-toimenpiteen aikana otettu näyte (punainen pallo) olivat jo edenneet kuvan 80 vaurioalueelle, mutta elvyttäminen onnistui palauttamaan arvot vaurioalueen ulkopuolelle (punaiset kolmiot). Nämä tulokset ovat yhteneviä kentällä tapahtuvan päällysteen kunnon arvioimisen kanssa, sillä ennen Rem-toimenpidettä bituminäytteiden 2CA ja 2CC (olivat jo vaurioalueella) kohdassa oli päällysteessä havaittavissa jo purkautumista. Muilla alueilla näytteet eivät G-R-parametrin mukaan olleet vanhentuneet vielä niin paljon, että ne lähestyisivät kuvaajan vaurioaluetta. Jos G-R-parametrien arvoja verrataan tunkeumien kanssa, voidaan havaita, että kaikki viisi näytettä, jotka olivat edenneet jo kuvan 80 vaurioalueelle, olivat myös tunkeumaltaan kaikkein pienimpiä. Liitteen H taulukosta havaittiin, että kuvan 80 vaurioalueella olevien näytteiden ($G-R > 180 \text{ kPa}$), tunkeumat olivat pienempiä kuin 22.

Bitumin vanheneminen siirtää Black diagrammissa bitumin ominaisuuksia jäykemmiksi (G^* -arvot kasvavat) sekä elastisemmiksi (δ -arvot pienenevät) ja samalla kohti vaurioaluetta. Kuvasta nähdään selvästi, että mikään tiellä vanhenneista näytteistä ei ole onnistunut palautumaan lähellekään RTFOT-näytteen arvoa (lila neliö). Tämä kuvastaa sitä, että bitumin venymäominaisuudet heikkenevät huomattavasti bitumin vanhetessa eikä elvyttäminen pehmeällä bitumilla 650/900 nykyisillä määrillä pysty palauttamaan aina vanhentuneen bitumin venymäominaisuuksia alkuperäisiksi. Vanheneminen ja elvyttäminen näyttävät kuvan perusteella tapahtuvan samalla suoralla. Alueella 4 suoran muoto on hieman erilainen kuin muiden alueiden näytteiden osalta, jotka asettuvat hyvin samalle suoralle. Alueen 4 näytepisteiden muodostaman suoran trendi on enemmän vaakatasossa kuin muilla alueilla. Tämä saattaa johtua siitä, että alkuperäisen asfalttimassan sideainebitumina saatettiin käyttää jäykempää bitumilaatua (50/70).

Kuten tutkimuksen tuloksissa on käynyt jo monta kertaa ilmi, Rem-toimenpiteen yhteydessä tehty elvyttäminen ei onnistunut millään alueella palauttamaan tiellä vanhentuneen

neen bitumin reologisia ominaisuuksia tavoitellun RTFOT-näytteen veroisiksi. On kuitenkin syytä painottaa, että nykyisin käytettävällä elvyttimen määrällä on vaikutusta ominaisuuksien muuttumiseen. Otetaan tarkasteluun esimerkkinä alueet 2 ja 4. Ennen Rem-toimenpidettä ja elvyttimen lisäystä alueen 2 näytteet (punaiset ruudut) olivat selvästi vanhentuneempia kuin alueen 4 näytteet (keltaiset ruudut). Alueella 2 elvyttämällä onnistuttiin nostamaan G-R-parametrin arvoja (punaiset kolmiot), kun taas vastaavasti alueella 4 Rem-toimenpiteen jälkeen otetuilla näytteillä (keltaiset kolmiot) G-R-parametrin arvot kasvoivat ennen toimenpidettä olleista eli elvyttäminen epäonnistui. Kuvasta 80 voidaan havaita, että alueiden 2 ja 4 Rem-toimenpiteen jälkeen otettujen näytteiden G-R-arvot ovat suunnilleen samoja. Alun perin vanhentuneempi alue voidaan onnistuneella elvytyksellä siis nostaa samoihin G-R-arvoihin kuin alun perin vähemmän vanhentunut alue, jossa elvytymäärät olivat selvästi tavoitteita pienemmät, jolloin G-R-arvotkin nousivat. Vastaavanlainen käyttäytyminen voidaan havaita myös tunkeumissa.

6.2 Relaksaatiomoduuli

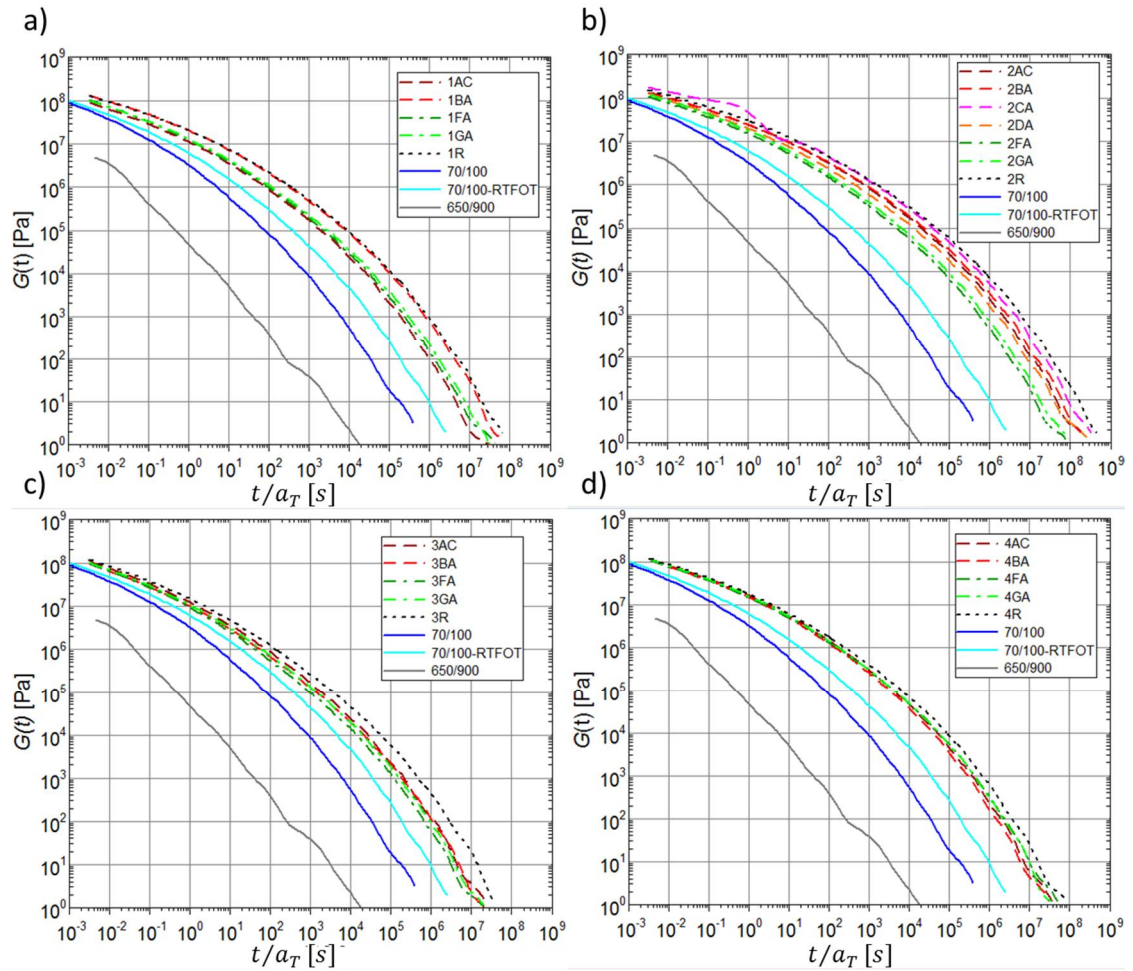
Tutkimuksessa selvitettiin myös, miten bitumin relaksaatio-ominaisuudet muuttuvat, kun bitumi vanhenee tai vanhentunutta bitumia elvytetään. Relaksaatio-ominaisuuksia tutkittiin relaksaatiomoduulin ($G(t)$) avulla. Tässä tutkimuksessa taajuuspyyhkäisydatasta tehtyjen varasto- (G') ja häviömoduulien (G'') Master-käyrien data muunnettiin relaksaatiomoduulin muotoon IRIS-ohjelman avulla käyttäen Baumgaertelin ja Winterin kehittämää menetelmää (Baumgaertel ym. 1989). Relaksaatiomoduulit määritettiin kaikille näytteille ja kuvassa 81 relaksaatiomoduulien käyrät on esitetty alueittain ajan suhteen lämpötilassa 5 °C.

Relaksaatiomoduulilla kuvataan materiaalin viskoelastista käyttäytymistä, kun materiaaliin aiheutetaan muodonmuutos, kuten esimerkiksi päällysteessä lämpökutistumisesta johtuva venymä, joka synnyttää materiaaliin jännityksen. Relaksaatiomoduulilla voidaan esittää, miten ja kuinka nopeasti viskoelastisella materiaalilla (kuten bitumi) nämä jännitystilat (esitetään moduuliarvona) alkavat vapautua, jos muodonmuutos pysyy vakiona. Relaksaatiomoduulin käyrässä jännitysten relaksoituminen ilmenee moduuliarvojen laskuna ajan kuluessa.

Kaikkien alueiden kuvista (a)...d)) voidaan nähdä, että jo RTFOT-vanhennus (vaalean sininen käyrä) leventää relaksaatiokäyrää verrattaessa tuoreeseen referenssibitumiin ja kaikilla alueilla tieltä otetut näytteet tuottavat vieläkin leveämmät relaksaatiomoduulin käyrät. Tämä tarkoittaa, että kun bitumi vanhenee, sen kyky relaksoida siihen syntyviä jännityksiä heikkenee, eli jännityksen relaksoituminen ($G(t)$ -arvon pienentyminen) tiettyyn arvoon kestää kauemmin (relaksaatioaika pitenee). Relaksaatiomoduulikäyrän leventyminen johtuu vanhenemisessa tapahtuvan bitumin elastisuuden eli kimmoisuuden kasvusta (vaihekulman pienentyminen). Vanhentuneella bitumilla suurempi osa materiaalikäyttäytymisestä on kimmoisaa eli muodonmuutoksessa syntyvät jännitykset eivät pysty relaksoitumaan.

Kuvan 81 kohdissa a)...d) on myös kuvattu, miten relaksaatiomoduulin käyrä muuttuu Rem-toimenpiteen eri vaiheissa verrattuna tuoreen ja RTFOT-näytteen ominaisuuksiin. Relaksaatio-ominaisuuksia ei millään alueella pystytty elvyttämällä palauttamaan RTFOT-näytteen ominaisuuksiin. Alueella 2 (b) elvyttämällä (vihreät käyrät) onnistuttiin lyhentämään bitumin relaksaatioaikaa ennen Rem-toimenpidettä otetuista. Alueilla 3 (c) ja 4 (d) selvää muutosta ennen ja jälkeen Rem-toimenpiteen otetuilla näytteillä ei ollut havaittavissa. Näillä alueilla elvyttimen lisäys onnistui vain palauttamaan Rem-

toimenpiteen yhteydessä tapahtuvan relaksaatioajan kasvun (näytteet 3R ja 4R) ennen toimenpidettä olleisiin relaksaatio-ominaisuuksiin.



Kuva 81. Relaksaatiomodulin kuvaajat alueittain a)...d)

Tässä diplomityössä relaksaatiomodulien käyriä verrattiin ainoastaan keskenään, mutta tarkempaa analyysia relaksaatiomodulien arvoista ei tehty, koska se ei enää kuulunut tämän diplomityön laajuuteen.

7 Pohdintaa

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten bitumisen sideaineen vanheneminen ja vanhentuneen sideaineen elvyttäminen pehmeällä bitumilla muuttavat bitumin reologisia ominaisuuksia sekä miten näitä ominaisuuksien muutoksia voidaan todentaa ja arvioida reologisten parametrien avulla.

Vanheneminen

Bitumin vanhenemista tutkittiin vertaamalla tieltä porattujen näytteiden bitumeja tuoreeseen 70/100-bitumiin sekä sen RTFOT-vanhennettuun näytteeseen. Näiden avulla voitiin arvioida, miten tiellä vanhentuneen bitumin ominaisuudet ovat muuttuneet tuoreista sekä asfalttimassan valmistuksen jälkeisistä bitumin ominaisuuksista. Tutkimuksessa selvitettiin myös vaikuttiko Rem-toimenpiteessä tehtävä vanhentuneen päällysteen uudelleenlämmitys vielä bitumin vanhenemiseen.

Tutkimuksessa bitumin vanhenemisen todettiin kasvattavan bitumin jäykkyyttä, mikä ilmeni tuloksista tunkeumien pienenemisenä sekä reometrimittauksissa kompleksimoduularvojen kasvuna. Bitumin vanheneminen kasvatti myös bitumin elastisuutta, mikä taas ilmeni reometrimittauksissa vaihekulmien laskuna. Jäykkyys ja elastisuus kasvoivat jo asfalttimassan valmistuksessa tapahtuvassa bitumin vanhenemisessä, kun tämän vanhenemisen vaikutuksen määrittämiseen käytettiin RTFOT-vanhennusta. Kun vanhentuneita tienäytteitä verrattiin referenssinäytteisiin, havaittiin, että vanhenemisen johdosta tapahtuvat jäykkyyden ja elastisuuden kasvut olivat vielä jatkuneet asfalttimassan valmistuksen jälkeisistä bitumin ominaisuuksista. Tiellä tapahtuvan pitkäaikaisvanhenemisen suuruuden todettiin johtuvan päällysteen tyhjätilasta eli mitä suurempi tyhjätila tutkituilla poranäytteillä oli, sitä enemmän näytteen bitumi oli vanhentunut. Bitumin todettiin myös vanhentuvan vielä lisää Rem-toimenpiteen yhteydessä ennen lisämassan ja elvyttimen lisäämistä.

Vanhennusindeksien avulla havaittiin, että vanhenemisen vaikutuksen suuruus vaihteli mittauslämpötilan mukaan ja mitä enemmän bitumi oli vanhentunut, sitä suuremmat erot vanhennusindekseissä eri lämpötilojen välillä oli. Kun tiellä vanhentuneiden näytteiden bitumeja verrattiin tuoreeseen bitumiin, oli kompleksimoduulin suhteellinen kasvu pienintä alhaisissa lämpötiloissa ja voimakkainta lämpötiloissa 50...60 °C. Esimerkiksi, kun lämpötila nousi lämpötilasta 20 °C lämpötilaan 60 °C, kasvoivat vanhenemisindeksin arvot näytteestä riippuen noin kaksin- tai jopa kolminkertaisiksi. Tämä tarkoittaa, että bitumin vanhenemisessä tapahtuva jäykkyyden suhteellinen kasvu lämpötilassa 60 °C on jopa kaksin- tai kolminkertainen verrattuna lämpötilassa 20 °C tapahtuvaan kasvuun. Vanhennuksen suuruuden vaikutusta arvioitiin myös vanhentuneiden näytteiden elastisuuden eroina ($\Delta\delta$) referenssinäytteisiin eri lämpötiloissa. Elastisuuden muutokset tuoreeseen referenssibitumiin verrattuina olivat suurimmillaan lämpötiloissa 20...30 °C ja pienenivät lämpötilan laskiessa tai noustessa. Esimerkiksi, kun lämpötila laski lämpötilasta 60 °C lämpötilaan 25 °C, kasvoivat $\Delta\delta$ -arvot jopa 10 °. Tämä taas tarkoittaa, että bitumin vanhenemisessä tapahtuva elastisuuden kasvu on jopa 10 ° suurempaa lämpötilassa 25 °C kuin lämpötilassa 60 °C.

Bitumin vanhenemisen vaikutusta arvioitiin myös Black diagrammien ja relaksaatiomoduulien avulla. Tutkimuksen bituminäytteiden Black diagrammeista havaittiin, että vanheneminen muutti bitumin jäykkyyden ja elastisuuden suhdetta, kun tuloksia verrattiin tuoreeseen referenssibitumiin. Vanhentunut bitumi oli muuttunut elastisemmaksi, kun

ominaisuuksia verrattiin samassa jäykkyydessä. Esimerkiksi, kun vaihekulman arvoja verrattiin jäykkyydessä 1 MPa, olivat vanhentuneiden näytteiden vaihekulmat keskimäärin noin 7° pienempiä kuin tuoreen bitumin eli vanhentuneesta bitumista oli tullut tämän verran elastisempaa. Bitumin vanheneminen muutti myös sen relaksaatioominaisuuksia, mikä ilmeni tuloksista vanhentuneiden näytteiden leveämpinä relaksaatiomodulin käyrinä kuin tuoreen ja RTFOT-vanhennetun referenssinäytteiden käyrät. Tämä tarkoittaa, että bitumin kyky relaksoida siihen syntyviä jännityksiä heikkenee, kun se vanhenee. Esimerkiksi tuoreessa bitumissa jännityksen relaksoituminen jäykkyyteen 1 MPa kesti alle kymmenen sekuntia, kun alueen 2 kaikkein vanhentuneimmilla bitumeilla vastaava relaksaatioaika oli yli 1000 s eli melkein 20 minuuttia.

Elvyttäminen

Vanhentuneen bitumin elvyttämistä pehmeällä bitumilla (650/900) tutkittiin kahdella eri tavalla. Elvyttämisen vaikutusta arvioitiin vertaamalla Rem-toimenpiteen jälkeen otettuja näytteitä, joihin elvytintä oli lisätty, tuoreeseen ja RTFOT-vanhennettuun sekä samalta alueelta ennen Rem-toimenpidettä sekä sen aikana otettuihin näytteisiin. Kun tuloksia verrattiin tuoreeseen ja RTFOT-vanhennettuun referenssiin, voitiin selvittää, miten elvyttämisen onnistui palauttaa bitumin ominaisuuksia tuoreen sekä uuden levitetyn asfalttimassan bitumin veroisiksi. Kun tuloksia verrattiin ennen Rem-toimenpidettä otettujen näytteiden ominaisuuksiin, voitiin arvioida, miten elvyttäminen muutti vanhentuneen bitumin ominaisuuksia. Monissa tutkimuksissa elvytyksellä pyritään palauttamaan tuoreen bitumin ominaisuudet, mutta tässä tutkimuksessa realistisena tavoitteena pidettiin referenssibitumin RTFOT-vanhennetun näytteen ominaisuuksien palautusta.

Vertaaminen tavoiteltuihin arvoihin

Kaikkien alueiden tuloksista oli selvästi nähtävissä, että elvyttäminen ei pystynyt palauttamaan vanhentuneen bitumin reologisia ominaisuuksia tuoreen eikä edes RTFOT-vanhennetun referenssibitumin veroisiksi. Elvytetyt näytteet jäivät jäykemmiksi kuin tavoitellut näytteet, mikä ilmeni tuloksista tavoiteltuja arvoja pienempinä tunkeumina sekä suurempina kompleksimodulin arvoina. Vastaavasti elvytetyt näytteet jäivät elastisemmiksi kuin tavoitellut, mikä taas näkyi tavoitteita pienempinä vaihekulmina. Samaan päätelmään tultiin myös vanhenemisindeksien sekä $\Delta\delta$ -arvojen vertailuissa. Tutkimuksen tulokset siis tarkoittavat, että Rem-toimenpiteen yhteydessä tehty elvyttäminen pehmeällä bitumilla (650/900) nykyisin käytettävillä määrillä ei ollut riittävä, jotta pitkäaikaisessa vanhenemisessä tapahtunut bitumin jäykkyyden ja elastisuuden kasvu saataisiin palautumaan tavoitellulle bitumin alkuperäiselle jäykkyydelle ja elastisuudelle tiellä. Elvytyn ei myöskään pystynyt palauttamaan vanhentuneen bitumin relaksaatioominaisuuksia eikä jäykkyys-elastisuus-suhdetta tavoitellun RTFOT-vanhennetun referenssibitumin ominaisuuksiin.

Tutkimuksessa laskettiin myös tunkeumien avulla, ettei nykyisin käytettävillä ohjearvoilla ollut edes teoreettisesti mahdollista saavuttaa RTFOT-vanhennetun 70/100-bitumin tunkeumaa, koska näytteet olivat jo niin vanhentuneita. Laskelmien mukaan ohjearvoja käyttämällä bitumin tunkeumaa oli mahdollista nostaa pelkällä elvyttimellä 4...5 yksikköä ja elvyttimellä ja lisämassalla yhteensä 8 yksikköä.

Kaikilla kohteilla Rem-toimenpiteen tekovaiheessa havaittiin pintaannousua, jonka arveltiin johtuvan poranäytteistä mitatuista pienistä tyhjätiloista sekä suurista täyttöasteista. Tämä on merkki siitä, ettei elvytintä mahtunut ainakaan ohjearvoja enempää ja itse

asiassa kaikilla kohteilla keskimääräiset elvytinmäärät jäivät vielä ohjearvoistakin. Tämä tarkoittaa, että elvytinmäärän lisääminen nykyisestä ei onnistu ja tästä syystä elvyttämällä pehmeällä tiebitumilla 650/900 ei ole mahdollista saavuttaa tavoiteltuja ominaisuuksia. Ratkaisuna voisi olla elvyttimen muuttaminen vieläkin pehmeämmäksi, jolloin samalla määrällä elvytintä voitaisiin päästä lähemmäs tavoiteltuja ominaisuuksia. Elvyttimenä voitaisiin käyttää vieläkin pehmeämpiä viskositeettiluokiteltuja bitumilaatuja V1500 tai V3000 tai mahdollisesti siirtymistä kokonaan ei-bitumipohjaisiin elvytintyyppeihin, joiden viskositeetit ovat vieläkin alhaisempia.

Rem-toimenpiteen aikaiset muutokset

Elvyttämisen vaikutusta bitumin reologisiin ominaisuuksiin tutkittiin myös vertaamalla koealueittain Rem-toimenpiteen eri vaiheita keskenään. Näin voitiin tehdä päätelmiä perättäisten Rem-toimenpiteiden vaikutuksista bitumin vanhenemiseen ja elvyttämiseen. Kuten jo mainittiin, bitumin vanhenemista tapahtui myös Rem-toimenpiteen yhteydessä, mikä havaittiin jäykkyyden ja elastisuuden kasvuna, kun Rem-toimenpiteen aikana otettuja näytteitä verrattiin ennen toimenpidettä otettuihin. Jos elvytettyjä näytteitä verrattiin Rem-toimenpiteen aikana otettuihin näytteisiin, kaikilla neljällä tutkimuksen alueilla havaittiin, että elvyttämällä onnistuttiin palauttamaan vanhentumisen aiheuttamia muutoksia tunkeuma-, kompleksimoduuli- ja vaihekulman arvoissa. Elvyttämällä siis pystyttiin kasvattamaan vanhentuneen bitumin tunkeumaa ja vaihekulmaa sekä alentamaan kompleksimoduulin arvoja. Jos taas elvytettyjä näytteitä verrattiin ennen Rem-toimenpidettä otettuihin näytteisiin, tulokset vaihtelivat alueiden kesken. Se, pystyttiinkö elvyttimellä parantamaan sideaineen ominaisuuksia ennen Rem-toimenpidettä otettujen näytteiden ominaisuuksista, riippui kuinka paljon elvytintä pystyttiin käyttämään ja kuinka paljon lisämassaa käytettiin. Jos elvyttimen määrä oli pieni eikä lisämassaa tarvittu niin paljon, oli Rem-toimenpiteen aikana tapahtuva bitumin vanhenemisen vaikutus voimakkaampaa kuin elvytyksen ansiosta tapahtuva vanhenemisen vaikutuksen palauttaminen. Jos taas elvyttimen ja lisämassan määrät olivat tarpeeksi suuria, pystyttiin elvytyksessä parantamaan bitumin ominaisuuksia ennen Rem-toimenpidettä olevista, jolloin elvytys voidaan ajatella onnistuneeksi. Alueella 2 elvyttämällä onnistuttiin palauttamaan vanhentuneen bitumin ominaisuudet ennen Rem-toimenpidettä otettuja näytteitä korkeammiksi. Alueella 3 elvyttämällä onnistuttiin vain palauttamaan bitumin ominaisuudet ennen toimenpidettä otettujen näytteiden tasolle, kun taas alueella 4 elvytetty näytteet jäivät ennen toimenpidettä otettuja näytteitä alemmiksi. Alueen 4 elvytyksen heikompi tulos johtui todennäköisesti muista alueita pienemmästä raportoidusta elvyttimen määrästä. Alueella 1 elvyttämisen onnistuminen vaihteli näytteiden kesken. Vaihtelut bitumin relaksaatio-ominaisuuksissa olivat vastaavia.

Tutkimuksessa havaittiin, että Rem-toimenpiteen eri vaiheista otetut bituminäytteet tuottivat melko yhtenevät Black diagrammit eli bitumin jäykkyyden ja elastisuuden suhde ei juuri muuttunut Rem-toimenpiteen aikana tapahtuvassa vanhennuksessa eikä vanhenetun bitumin elvytyksessä.

G-R-parametri, LAS-testi ja MSCR-testi

Bitumin vanhenemisen ja elvyttämisen vaikutuksia tutkittiin myös G-R-parametrin avulla, jolla voitiin kuvata, miten bitumin vanheneminen muuttaa sen väsymiskestävyyttä. G-R-parametrille on kehitetty myös raja-arvot, joiden ylittyminen on eri tutkimusten perusteella oletettu johtavan mahdollisiin päällysteen väsymisvaurioihin. Tuloksista havaittiin, että alueen 2 näytteet olivat eniten vanhentuneita ja osa ennen Rem-

toimenpidettä otetuista bituminäytteistä oli jo vanhenemisen takia ylittänyt G-R-parametrille määritetyt raja-arvot, mutta elvyttäminen onnistui palauttamaan ominaisuudet takaisin raja-arvojen alle. Muilla alueilla näytteet eivät G-R-parametrin mukaan olleet vanhentuneet vielä niin paljon, että ne lähestyisivät näitä raja-arvoja. G-R-parametrien arvoja ja tunkeumia vertaamalla havaittiin, että bituminäytteet, joiden tunkeumat olivat alle 22, ylittivät G-R-parametrille määritetyn vauriokynnyksen.

LAS-testin tulokset täyttivät suurimmaksi osaksi niille asetetut minimiraja-arvot, mutta tulosten välillä oli huomattavia eroja muun muassa uutetun bitumin määrän vaikutuksessa mittaustuloksiin. Testin ja sen tulosten analysointi vaatii vielä lisätutkimusta ja esimerkiksi mittaustulosten vaikutus on syytä vielä tutkia ennen tarkempien päätelmien tekoa. Tutkimuksen tiellä vanhentuneilla näytteillä oli erinomaiset deformaatiokestävyysominaisuudet, koska MSCR-testin tulokset olivat selvästi niille asetettujen raja-arvojen alla. Tulokset olivat oletettuja, koska näytteet olivat vanhenemisen takia muuttuneet huomattavasti tuoretta bitumia jäykemmiksi ja kimmoisammiksi, mikä parantaa sideaineen deformaatiokestävyyttä. Koska näytteiden deformaatio-ominaisuudet olivat niin hyviä, ei tuloksia analysoitu tai vertailtu näytteiden kesken tarkasti.

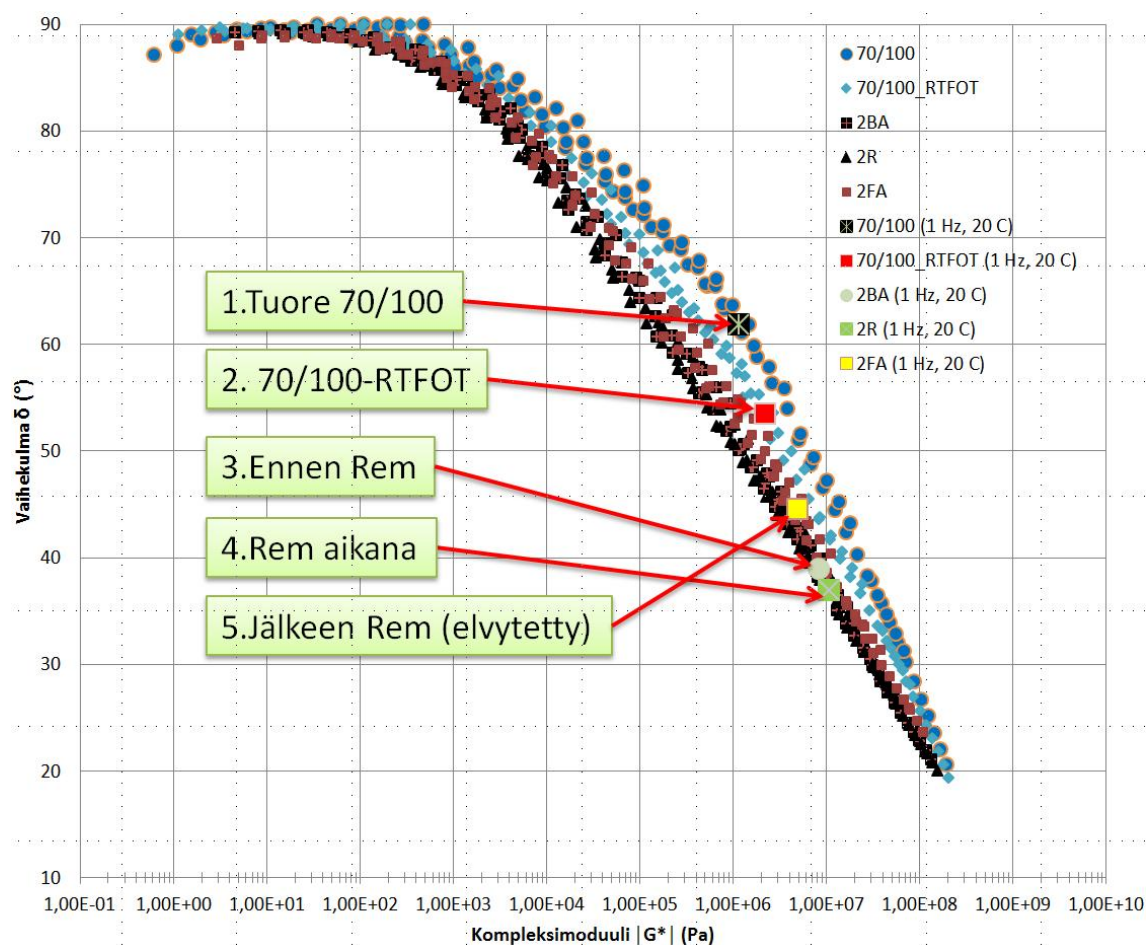
Hypoteesi

Työn hypoteesina oli, että vanheneminen muuttaa bitumin viskoelastisia ominaisuuksia tehden siitä elastisempaa, eikä elvyttämällä pehmeällä lisäbitumilla pystytä palauttamaan tätä muutosta, vaikka bitumin jäykkyys pystyttäisiinkin palauttamaan. Jos bitumin virtausominaisuuksia ei pystytä palauttamaan, on kyseenalaista voidaanko elvytystä tehdä bitumilla 650/900 vai pitääkö elvytintyyppiä vaihtaa.

Työn hypoteesi kehitettiin Blomberg ym. (2016) tekemän laboratoriotutkimuksen pohjalta, missä tutkittiin, miten 70/100-bitumin reologiset ominaisuudet muuttuivat, kun bitumia vanhennettiin ja elvytettiin pehmeällä tiebitumilla 650/900 laboratoriossa useita kertoja peräkkäin. Elvyttämällä pystyttiin palauttamaan vanhentuneen bitumin jäykkyys takaisin alkuperäiseksi, mutta ei bitumin virtavuutta, sillä vaihekulmat jäivät alkuperäisiä arvoja pienemmiksi. Tutkimuksessa elvytintä tosin tarvittiin 21...33 % palauttamaan vanhentuneen bitumin jäykkyys alkuperäiseksi, mikä oli huomattavasti enemmän kuin mitä tämän tutkimuksen Rem-toimenpiteessä käytettiin. Vastaavanlainen tarkastelu ei diplomityön näytteille ole mahdollinen, koska elvytys tehtiin huomattavasti pienemmällä bitumimäärällä, jolloin vanhentuneen bitumin jäykkyyttä ei pystytty elvyttämällä palauttamaan alkuperäiseksi. Tämän vuoksi vaihekulman muutosten tarkastelu ei ole yhtä suoraviivaista hypoteesin väittämän todentamiseksi.

Mittaustulosten perusteella bitumin vanheneminen muuttaa sen reologista käyttäytymistä niin, että sen jäykkyyden ja elastisuuden välinen suhde muuttuu, jolloin bitumista tulee vastaavalla jäykkyydellä elastisempaa kuin tuore bitumi. Rem-toimenpiteen eri vaiheiden välillä otettujen näytteiden Black diagrammien käyrien todettiin säilyvän lähes samanlaisina eli vanhentuneen bitumin elvyttäminen ei onnistunut palauttamaan bitumin jäykkyyden ja elastisuuden välistä suhdetta tuoreen veroiseksi. Kuvassa 82 on esitetty alueen 2 Rem-toimenpiteen eri vaiheista otettujen näytteiden Black diagrammit. Kuvaan on lisätty myös näytteiden mittapisteen taajuudella 1 Hz ja lämpötilassa 20 °C. Kuvasta voidaan nähdä, miten bitumin ominaisuudet muuttuvat vanhenemisessä sekä elvyttämisessä. Vaikka elvyttäminen onnistuu nostamaan vanhentuneen bitumin vaihekulmia ja pienentämään kompleksimoduuli-arvoja, vaikuttaisi siltä, että muutokset tapahtuvat silti suunnilleen samalla Black diagrammin käyrällä. Tällöin, vaikka elvytintä

voitaisiinkin lisätä niin paljon, että jäykkyys palautuisi alkuperäiseksi, liikkuisivat jäykkyyden ja elastisuuden väliset ominaisuudet silti samalla käyrällä, jolloin vaihekulmat jäisivät tavoitteita pienimmiksi. Jos elvyttäminen ei pysty muuttamaan bitumin vanhenemisessa syntynyttä jäykkyys-elastisuussuhteen muutosta, jää elvytetty bitumi aina tuoreta bitumia elastisemmaksi eli hypoteesi on totta. Toisaalta, koska bitumin vanheneminen hapettumalla muuttaa bitumin kemiallisia ominaisuuksia tehden siitä elastisempaa, on todennäköistä, etteivät muutkaan elvyttimet pysty palauttamaan tätä muutosta, jolloin välttämättä elvytintyyppin vaihtokaan ei tuo muutosta virtaavuusominaisuuksien heikkenemiseen. Tämän päätelmän todentaminen tosin vaatii lisää tutkimusta muista elvyttimistä.



Kuva 82. Alueen 2 Black diagrammit sekä yksittäisen mittauspisteen paikka käyrällä eri näytteillä.

8 Yhteenveto, päätelmät ja suositukset

Tämä diplomityö tehtiin täydentämään Liikenneviraston Aalto-yliopistossa teettämää tutkimusta asfaltin uusiokäytöstä. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten bitumisen sideaineen vanheneminen ja vanhentuneen sideaineen elvyttäminen pehmeällä bitumilla muuttavat bitumin reologisia ominaisuuksia sekä miten näitä ominaisuuksien muutoksia voidaan todentaa ja arvioida reologisten parametrien avulla.

Tutkimuksessa käytettävä aineisto koostui Vt 1:lle vuonna 2013 tehdyn Rem-kunnossapitotoimenpiteen yhteydessä poratuista ja kerätyistä näytteistä. Näytteitä kerättiin neljältä eri alueelta, joissa oli erilainen päällysteen ylläpitohistoria. Alueilla 1 ja 4 Rem-toimenpide tehtiin ensimmäisen kerran, kun se alueella 2 tehtiin toisen ja alueella 3 jo kolmannen kerran. Näytteitä porattiin kultakin alueelta sekä ennen että jälkeen Rem-toimenpiteen. Tämän lisäksi Rem-toimenpiteen yhteydessä kultakin alueelta kerättiin asfalttirouhenäyte.

Diplomityö oli pääasiassa sideainetutkimus, joka painottui bitumin reologisten ominaisuuksien mittauksiin reometrillä. Bituminäytteiden ominaisuuksia tutkittiin myös perinteisillä tunkeuma- ja Fraass-murtumispistetestillä, joiden arvoja myös verrattiin reometrillä saatuihin tuloksiin. Bitumin reologisia ominaisuuksia mitattiin reometrillä taajuuspyyhkäisy-, LAS- ja MSCR-testeillä. LAS-testissä pyritään tutkimaan bitumin väsymisominaisuuksia ja MSCR-testi mittaa bitumin deformaatioherkkyyttä. Suurin osa tutkimuksen analyysistä tehtiin taajuuspyyhkäisymittauksissa saatujen kompleksimoduulien ja vaihekulmien sekä perinteisen tunkeumatestin tulosten perusteella. Taajuuspyyhkäisyn mittaustuloksista tehtiin myös Master-käyrät, joiden avulla voitiin laskea ns. G-R-parametrien arvot, jotka mahdollistavat bitumin halkeilu- ja väsymisvaurioherkkyyden tarkastelun. Lisäksi taajuuspyyhkäisyn tulokset muunnettiin relaksaatiomoduulin muotoon, jolla voitiin kuvata, miten bitumin relaksaatio-ominaisuudet eli kylmävenymäominaisuudet muuttuvat. Tutkimuksessa mitattiin myös poranäytteiden tyhjiälait, täyttöasteet sekä sideainepitoisuudet, joiden arvot tukivat bitumitulosten analysointia. Tutkimuksen aikana mittauksissa nousi esiin myös tutkimusmenetelmiin liittyviä ongelmia ja kysymyksiä.

Tutkimuksessa näytteitä kerättiin laajasti jokaiselta koalueelta, mikä mahdollisti myös rinnakkaisten näytteiden tutkimisen. Yhtenä käytännön ongelmana selvitettiin, oliko porapaloista uutetun bitumin määrällä vaikutusta bitumitestien tuloksiin. Bituminäytteet koostuivat joko yhdestä porapalasta tai kolmesta porapalasta uutetusta näytteestä, joiden tuloksia verrattiin keskenään. Tutkimuksen perusteella havaittiin, että kolmesta porapalasta uutetut näytteet olivat hieman jäykempiä kuin yhdestä näytteestä uutetut, mutta erot olivat pieniä ja selvien päätelmien teko vaatii vielä lisätutkimusta. Tunkeuma-erot olivat keskimäärin yhden yksikön verran ja kompleksimoduulien suhteelliset erot olivat noin viisi prosenttia, mitkä molemmat olivat alle testauksen menetelmähajonnan.

Tutkimus paljasti myös, että bitumin uuttosuodatuksen jälkeen tehtävä liuottimen haihdutuksen onnistuminen bitumista oli ratkaisevaa tulosten analysoinnissa. Tutkimuksessa havaittiin, että haihdutuksessa bitumiin jääneen liuottimen vaikutus muutti näytteen mittaustuloksia tehden näytteestä liian pehmeitä. Tutkimuksessa liuottimen pehmennysvaikutus vaihteli liuottimen määrän perusteella tunkeuma-arvoissa alle mittaustarkkuuden rajoista aina jopa sadan tunkeumayksikön nousuun. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että uutettujen bituminäytteiden laadunvarmistusta tulee parantaa nykyisestä.

Tutkimuksessa mittauksia tehtiin pääasiassa dynaamisella leikkausreometrillä. Mittaukseen tarvittavan bitumin määrä on erittäin vähäinen (alle 1 g) ainakin verrattuna esimerkiksi tunkeuma-testissä vaadittavaan määrään (noin 100 g), mikä taas mahdollistaa, että poranäytteistä uutetun bitumin määrä voi olla huomattavasti nykyistä pienempi. Jos tulevaisuudessa siirrytään laajemmin käyttämään ainoastaan reometriä tulosten tarkastelussa, pitää uutetun bitumin määrän vaikutus mittaustuloksiin vielä varmentaa.

Yleisesti voidaan tutkimuksen perusteella sanoa, että taajuuspyyhkäisyssä saatavilla kompleksimoduulilla G^* ja vaihekulmalla δ voidaan kuvata tarkasti bitumin vanhenemisessa ja elvyttämisessä tapahtuvia reologisten ominaisuuksien muutoksia lämpötilan ja kuormitusajan suhteen. Vanhenemisessä tai elvyttämisessä tapahtuvia muutoksia on usein havainnollisempaa tutkia erilaisilla vanhenemisindekseillä, missä tutkittava arvo kuvaa vanhenemisessä tai elvyttämisessä tapahtuvan muutoksen suuruutta.

Tunkeuma-arvojen ja reometrillä mitattujen kompleksimoduulien G^* ja vaihekulmien δ välillä oli vahva korrelaatio, R^2 arvot olivat 0,988 ja 0,953. Käytännössä siis molempia sekä tunkeumaa että kompleksimoduulia voidaan käyttää laadunvarmistuksessa rinnan. On kuitenkin huomattava, että korrelaatio saavutettiin modifioimattomille ja lämpötilaherkkydeltään samanlaisilla bitumeilla ja tuloksia ei voi yleistää koskemaan lämpötilaherkkydeltään erilaisia bitumeja. Korrelaatio on saatu vain yhdellä reometrillä mitatuista arvoista yhden henkilön tekemänä samalla näytteenvalmistustekniikalla. Fraass-testin korrelaatio G^* kanssa oli $R^2=0,628$. Heikompaan korrelaatioon on saattanut vaikuttaa Fraass-testille ominainen suuri hajonta mitatuissa murtumispisteissä, mutta tuloksista nähdään silti selvä ja odotettu trendi eli jäykkyyden kasvaessa bitumin murtumispistelämpötila nousee ja halkeiluvaara kasvaa.

Erityisesti vaihekulmalla voitiin havaita myös sellaisia eroavaisuuksia, mitä ei perinteisillä mittausten menetelmillä saaduista tuloksista eikä kompleksimoduuli-arvoista havaittu. Ongelmana vaihekulmien arvioinnissa ja muissakin reometrin parametreissa kuitenkin on, ettei tuloksia pystytä vielä yhdistämään ja sitomaan Suomen teillä vaadittuihin päällysteen ominaisuuksiin, joiden perusteella raja-arvoja voitaisiin asettaa. Tästä syystä kenttätietoihin perustuvan reometrimittausdatan kerääminen on menetelmän hyödyntämisen ja kehittämisen kannalta tärkeää.

Tutkimuksessa tehtiin myös MSCR- ja LAS-testit. MSCR-testin tuloksista oli nähtävissä suurta yhtenevyyttä taajuuspyyhkäisyssä saatuihin tuloksiin ja jos tutkittavat bitumit ovat modifioimattomia, kuten tässä tutkimuksessa, ei testi välttämättä ole tarpeellinen. Tulokset myös todensivat oletettua päätelmää, ettei deformaatiourautuminen ole ongelmana vanhentuneilla bitumeilla. Tutkimuksen LAS-testin käsittely ja analysointi jäivät vähäiseksi diplomityön laajuuden vuoksi. Testin ja sen tulosten analysointi vaatii vielä lisätutkimusta ja esimerkiksi mittaustilalämpötilan vaikutus on syytä vielä tutkia ennen tarkempien päätelmien tekoa.

Toisaalta taajuuspyyhkäisymittausten tuloksista on myös kehitetty väsymiskestävyyttä kuvaava G-R-parametri, jolla pyritään siis kuvaamaan LAS-testin tapaan bitumin vanhenemisen johdosta tapahtuvia muutoksia bitumin väsymiskestävyydessä. G-R-parametrille on kehitetty myös raja-arvot, joiden ylittymisen on eri tutkimusten perusteella oletettu johtavan mahdollisiin päällysteen väsymisvaurioihin. G-R-parametrien arvoja ja tunkeumia vertaamalla havaittiin, että bituminäytteet, joiden tunkeumat olivat alle 22, ylittivät G-R-parametrille määritetyn vauriokynnyksen. Nämä tulokset tukivat myös kentällä tehtyä päällysteen kunnon arviointia, sillä niissä tien kohdissa, joissa bi-

tuminäytteet ylittivät vauriokynnyksen, oli myös päällysteessä jo havaittavissa purkautumista.

Keskeisenä päätelmänä tutkimuksessa voidaan todeta, että elvyttämällä asfalttipäällystettä pehmeällä tiebitumilla (650/900) ei bitumin vanhenemisesta johtuvia ominaisuuksien muutoksia ole mahdollista palauttaa nykyisin käytettävillä elvytinmäärillä alkuperaisiksi eikä elvytinmäärää voida lisätä Rem-toimenpiteen aiheuttamien päällysteen tilavuussuhteiden muutosten vuoksi. Koekohteilla tyhjätilat jäivät yleisesti alle 2 %, jolloin bitumin täyttöaste kiviaineksen tyhjätilassa kasvoivat paikoin jopa 100 %:iin asti ja ylimääräinen bitumi nousi päällysteen pintaan. Jotta elvyttäminen voisi onnistua tavoitteissaan, pitää elvytintyyppiä todennäköisesti vaihtaa viskositeetiltaan alempaan elvytintyyppiin, kuten vielä pehmeämpiin bitumilaatuihin (V1500 ja V3000). Kyseisten elvyttimien tehokkuus tulisi kuitenkin varmentaa tämän tutkimuksen kaltaisella jatkotutkimuksella.

Vaikka elvyttämällä pehmeällä bitumilaadulla 650/900 ei millään koealueella pystytty palauttamaan vanhentuneen sideaineen ominaisuuksia RTFOT-vanhennetun näytteen veroisiksi, pystyttiin onnistuneella elvytyksellä silti parantamaan vanhentuneen sideaineen reologisia ominaisuuksia eli pienentämään kompleksimoduularvoja sekä nostamaan tunkeumaa ja suurentamaan vaihekulmia. Toisaalta, jos elvyttimen määrä jää vielä nykyisiä ohjearvoja pienemmäksi, kasvaa mahdollisuus, että Rem-toimenpiteen yhteydessä tapahtuva bitumin vanheneminen heikentää entisestään bitumin reologisia ominaisuuksia, eikä elvyttämällä pystytä palauttamaan sideaineen ominaisuuksia edes ennen toimenpidettä olevia vastaaviksi, kuten kävi alueella 4. Elvyttimen lisäyksen positiivinen vaikutus voitiin todentaa erityisesti alueen 2 G-R-arvojen vertailussa. Osa vanhentuneista näytteistä oli jo ajautunut vaurioitumista ennustavien väsymisvaurioalttiusrajojen yläpuolelle, mutta elvyttäminen onnistui palauttamaan arvot takaisin rajojen alapuolelle.

Vaikka elvyttimen käytöllä pystyttiin parantamaan vanhentuneen sideaineen reologisia ominaisuuksia, eivät vaihekulman ja kompleksimoduulin muutokset tapahtuneet samassa suhteessa. Tuloksista oli havaittavissa, että vaikka elvyttämällä pystyttäisiinkin palauttamaan bitumin jäykkyys takaisin alkuperäiseksi, bitumi jäisi silti alkuperäisiä ominaisuuksiaan elastisemmaksi. Tällöin elvytettyjen näytteiden virtaus- ja relaksaatio-ominaisuudet jäisivät heikommiksi kuin tuoreen bitumin.

Tässä tutkimuksessa käytettävien mittaustulosten analysointia suositellaan jatkettavan ainakin relaksaatio-ominaisuuksien osalta. Relaksaatiomoduulin arvoja verrattiin vain keskenään, mutta tavoitteena olisi tarkastella mitattujen arvojen suuruutta suhteessa todellisiin relaksaatioaikoihin päällysteen elinkaaren aikana. Tuloksia on suositeltavaa pyrkiä vertaamaan päällysteen kunnon arviointiin, jotta relaksaatioajoille voitaisiin mahdollisesti löytää raja-arvoja. Bitumin relaksaatio-ominaisuuksia olisi myös suositeltavaa tutkia vieläkin kylmemmissä mittaustilastoissa, jolloin saataisiin tietoa bitumin relaksoitumisesta lämpötiloissa, joissa pakkashalkeilua voi jo tapahtua.

Tutkimuksen näytekohteiden seurantaa suositellaan jatkettavaksi pidemmällä aikavälillä, jotta Rem-toimenpiteen onnistumista voidaan arvioida myös kenttätulosten perusteella. Tulevaisuudessa samoilta kohteilta voitaisiin kerätä myös näytteitä, joiden perusteella tässä työssä tehtyjä päätelmiä voitaisiin varmistaa, kun tarkat tiedot aiemmista ominaisuuksista ovat jo selvillä.

Lähdeluettelo

AASHTO MP 19-10. 2011. *Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test*. Washington D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO T 315-10. 2011. *Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)*. Washington D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO TP 70-11. 2011. *Standard Method of Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)*. Washington D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO TP 101-12-UL. 2012. *Standard Method of Test for Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep*. Washington D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Airey, G. D. 1997. *Rheological characteristics of polymer modified and aged bitumens*. Väitöskirja. University of Nottingham. 256 s.

Airey, G. D. 2002. *Use of black diagrams to identify inconsistencies in rheological data*. Road Materials and Pavement Design. Vol 3:4. S. 403-424.

Al-Qadi, I. L., Elseifi, M., & Carpenter, S. H. 2007. *Reclaimed asphalt pavement—a literature review*. Illinois Center for Transportation. Research Report FHWA-ICT-07-001. 23 s. ISSN 0197-9191.

Anderson, D. A., Christensen, D.W., Bahia, H.U., Dongre, R., Sharma, M.G., Antle, C.E., Button, J. 1994, *Binder Characterization and Evaluation - Volume 3: Physical Characterization*. Washington D. C: National Research Council. SHRP-A-369. 475 s. ISBN 0-309-05767-1.

Apilo, L. & Eskola, K. 1999. Uusiopäällystetutkimukset 1998. Helsinki. Tielaitos. Tielaitoksen selvityksiä 7/1999. 40 s. ISSN 0788-3722, ISBN 951-726-497-6, TIEL 3200553.

Bahia, H., U. 2009. *Chapter 2: Modeling of Asphalt Binder Rheology and Its Application to Modified Binders*. Teoksessa: Kim, Y., R. (toim.) Modeling of Asphalt Concrete. New York: American Society of Civil Engineers. S. 11-61. ISBN 978-0-07-146462-8.

Baumgaertel, M., & Winter, H. H. 1989. *Determination of discrete relaxation and retardation time spectra from dynamic mechanical data*. Rheologica Acta. Vol 28:6. S. 511-519.

Berker, A. 1998. *Basic relationships in linear viscoelasticity*. Julkaisematon.

Blomberg, T. 1990. *Bitumit*. Jyväskylä: Neste Oy ja Rakentajain Kustannus Oy. 154 s. ISBN 951-676-488-6.

Blomberg, T., Makowska, M. & Pellinen, T. 2016. *Laboratory simulation of bitumen aging and rejuvenation to mimic multiple cycles of reuse*. Proceedings of 6th Transport Research Arena, April 18-21, Warsaw, Poland. Lähetetty arvioitavaksi.

Chen, J. S., Huang, C. C., Chu, P. Y., & Lin, K. Y. 2007. *Engineering characterization of recycled asphalt concrete and aged bitumen mixed recycling agent*. Journal of Materials Science. Vol 42:23. S. 9867-9876.

Corbett, L. W. 1969. *Composition of asphalt based on generic fractionation, using solvent deasphalting, elution-adsorption chromatography, and densimetric characterization*. Analytical Chemistry. Vol. 41:4. S. 576-579.

Cox, W. P. & Merz, E. H. 1958. *Correlation of Dynamic and Steady Flow Viscosities*. Journal of Polymer Science. Vol. 28. S. 619-622.

Delgadillo, R., Nam, K. & Bahia, H. U. 2006. *Why do we need to change $G^*/\sin\delta$ and how?*. Road Materials and Pavement Design. Vol. 7/8. S. 7-27. ISSN 1468-0629.

Dony, A., Colin, J., Bruneau, D., Drouadaine, I., & Navaro, J. 2013. *Reclaimed asphalt concretes with high recycling rates: changes in reclaimed binder properties according to rejuvenating agent*. Construction and Building Materials. Vol. 41. S. 175-181.

Dunn, L. 2001. *Basic Asphalt Recycling Manual*. USA: Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA).

Ferry, J. D. 1980. *Viscoelastic properties of polymers*. 3rd ed. New York: John Wiley sons. 642 s. ISBN 0471048941.

Glover, C. J., Davison, R. R., Domke, C. H., Ruan, Y., Juristyarini, P., Knorr, D. B., & Jung, S. H. 2005. *Development of a new method for assessing asphalt binder durability with field validation*. Texas Transportation Institute. Texas A & M University System. No. FHWA/TX-05/1872-2.

Huang, S. C., Pauli, A. T., Grimes, R. W., & Turner, F. 2014. *Ageing characteristics of RAP binder blends—what types of RAP binders are suitable for multiple recycling?*. Road Materials and Pavement Design. Vol. 15:1. S. 113-145. DOI: 10.1080/14680629.2014.926625.

Hänninen, M. 2013. *Muutostarpeiden kartoitus remix-osastolla*. Opinnäytetyö. Saimaan ammattikorkeakoulu, rakennus-tekniikan koulutusohjelma. Lappeenranta. 30 s.

Karlsson, R. & Isacsson, U. 2006. *Material-Related Aspects of Asphalt Recycling--State-of-the-Art*. Journal of Materials in Civil Engineering. Vol. 18:1. S. 81-92. DOI 10.1061.

King, G., Anderson, M., Hanson, D., & Blankenship, P. 2012. *Using black space diagrams to predict age-induced cracking*. Teoksessa: Scarpas, A., Kringos, N., Al-Qadi, I. & Loizos, A. (toim.). 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements. s. 453-463.

Kuang, D., Feng, Z., Yu, J., Chen, X. & Zhou, B. 2011. *A New Approach for Evaluating Rejuvenator Diffusing into Aged Bitumen*. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition. Vol. 26:1. S. 43-46. ISSN 1000-2413.

Lahtinen, T. 1984. *Sideaineen ominaisuuksien parantaminen vanhan asfaltin uudelleen-käytössä*. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, rakennusinsinööriosasto. Espoo. 44 s.

Laukkanen, O. V., Pellinen, T., & Makowska, M. 2013. *Exploring the Observed Rheological Behaviour of In-Situ Aged and Fresh Bitumen Employing the Colloidal Model Proposed for Bitumen*. Multi-Scale Modeling and Characterization of Infrastructure Materials: Proceedings of the International RILEM Symposium Stockholm, June 2013. S. 185-197. ISBN 978-94-007-6877-2.

Lesueur, D. 2009. *The Colloidal Structure of Bitumen: Consequences on the Rheology and on the Mechanisms of Bitumen Modification*. Advances in Colloid and Interface science. Vol. 145:1-2. S. 42-82. ISSN 0001-8686. DOI 10.1016.

Lu, X., & Isacsson, U. 2002. *Effect of ageing on bitumen chemistry and rheology*. Construction and Building Materials. Vol 16:1. S. 15-22. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016.

Macosko, C. W. 1994. *Rheology: principles, measurements, and applications*. New York: Wiley-VCH. 550 s. ISBN 0-471-18575-2.

Makowska, M., & Pellinen, T. 2016. *Development of Specifications and Guidelines for Hot in-Place Recycling in Finland—Outline and Framework*. Teoksessa: Canestrari, F. & Partl, M. N. (toim.). 8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials. S. 851-862.

Mangiafico, S. 2014. *Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and corresponding binder blends*. Väitöskirja. l'École Nationale des Travaux Publics de l'État. 312 s.

Masson, J. F., Polomark, G. M., & Collins, P. 2002. *Time-Dependent Microstructure of Bitumen and its Fractions by Modulated Differential Scanning Calorimetry*. Energy & Fuels. Vol. 16:2. S. 470-476. DOI 10.1021/ef010233r.

Mastrofini, D., & Scarsella, M. 2000. *The Application of Rheology to the Evaluation of Bitumen Ageing*. Fuel. Vol. 79:9. S. 1005-1015. DOI 10.1016/S0016-2361(99)00244-6.

Mezger, T., G. 2014. *The Rheology Handbook*. 4th ed. Hannover, Germany: Vincentz Network. 432 s. ISBN 3-86630-842-6.

PANK ry. 2011. *Afalttinormit 2011*. Vantaa: Päällystealan neuvottelukunta PANK ry. ISBN 978-952-99985-1-7.

Patosalmi, S. 1996. *Vanhan asfalttipäällysteen sideaineen elvyttimet*. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, rakennus- ja yhdyskuntatekniikan osasto. Espoo. 46 s.

Pfeiffer, J. P., & Saal, R. N. J. 1940. *Asphaltic Bitumen as Colloid System*. The Journal of Physical Chemistry. Vol. 44:2. S. 139-149. DOI 10.1021/j150398a001

Pohjoismaiden tie- ja liikennefoorumi (PTL). 2012. *Uusioasfaltti*. Suomi: Erikoismedia Oy. 16 s.

Qin, Q., Schabron, J. F., Boysen, R. B., & Farrar, M. J. 2014. *Field aging effect on chemistry and rheology of asphalt binders and rheological predictions for field aging*. Fuel. Vol. 121. S. 86-94. DOI 10.1016/j.fuel.2013.12.040

Rantanen, T. & Suikki, L. 2009. *Uusiopäällysteiden käyttö päällysteiden ylläpidossa*. Helsinki: Tiehallinto. Tiehallinnon sisäisiä julkaisuja 56/2009. 20 s. ISSN 1459-1561, TIEH 4000731-V.

Ruan, Y., Davison, R. R., & Glover, C. J. 2003. *The effect of long-term oxidation on the rheological properties of polymer modified asphalts* ☆. Fuel. Vol. 82:14. S. 1763-1773. DOI 10.1016/S0016-2361(03)00144-3.

Ruan, Y., Davison, R. R., & Glover, C. J. 2003b. *An Investigation of Asphalt Durability: Relationships Between Ductility and Rheological Properties for Unmodified Asphalts*. Petroleum Science and Technology. Vol. 21:1-2. S. 231-254. ISSN 1091-6466. DOI: 10.1081/LFT-120016946.

SFS-EN 1426. 2015. *Bitumen and bituminous binders. Determination of needle penetration*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 15 s.

SFS-EN 1427. 2015. *Bitumen and bituminous binders. Determination of softening point. Ring and Ball method*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 18 s.

SFS-EN 14770. 2015. *Bitumen and bituminous binders. Determination of complex shear modulus and phase angle. Dynamic shear rheometer (DSR)*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 16 s.

SFS-EN 12593. 2015. *Bitumen and bituminous binders. Determination of the Fraass breaking point*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 17 s.

SFS-EN 12595. 2014. *Bitumen and bituminous binders. Determination of kinematic viscosity*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 19 s.

SFS-EN 12607-1. 2014. *Bitumen and bituminous binders. Determination of the resistance to hardening under influence of heat and air. Part 1: RTFOT-method*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 16 s.

SFS-EN 12697-1. 2013. *Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 1: Soluble binder content*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 48 s.

SFS-EN 12697-3. 2013. *Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 3: Bitumen recovery: Rotary evaporator*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 16 s.

SFS-EN 12697-8. 2003. *Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 16 s.

Shell Bitumen U.K. 1990. *The Shell Bitumen Handbook*. Chertsey, United Kingdom: Shell Bitumen U.K. 336 s. ISBN 0-9516625-0-3.

Shell Bitumen U.K. 2003. *The Shell Bitumen Handbook*. 5th ed. Chertsey, United Kingdom: Shell Bitumen U.K. 460 s. ISBN 0 7277 3220 X

Shen, J., Amirkhanian, S., & Aune Miller, J. 2007. *Effects of Rejuvenating Agents on Superpave Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement*. Journal of Materials in Civil Engineering. Vol. 19:5. S. 376-384. ISSN 0899-1561

Shenoy, A. 2008. *Nonrecovered Compliance from Dynamic Oscillatory Test vis-à-vis Nonrecovered Compliance from Multiple Stress Creep Recovery Test in the Dynamic Shear Rheometer*. International Journal of Pavement Engineering. Vol. 9:5. S. 329-341. ISSN 1029-8436.

Soenen, H., de La Roche, C., & Redelius, P. 2003. *Fatigue Behaviour of Bituminous Materials: From Binders to Mixes*. Road Materials and Pavement Design. Vol. 4:1. S. 7-27. DOI 10.1080/14680629.2003.9689938.

Soenen, H., Blomberg, T., Pellinen, T., & Laukkanen, O. V. 2013. *The multiple stress creep-recovery test: a detailed analysis of repeatability and reproducibility*. Road Materials and Pavement Design. Vol. 14:1. S. 2-11. DOI: 10.1080/14680629.2013.774742.

Spiegel, M., R., Liu, J., L. & Lipschutz, S. 1999. *Schaum's Outline Series: Mathematical Handbook of Formulas and Tables*. 2nd sd. New York, USA: McGraw-Hill. 278 s. ISBN 0-07-038203-4.

Bahia, H., Tabatabaee, H., Mandal, T. & Faheem, A. 2013. *Field Validation of Wisconsin Modified Asphalt Binder Selection Guidelines-Phase II*. Madison: Wisconsin Department of Transportation.

Tielaitos. 1997. *Päällysteiden suunnittelu*. Helsinki. Tielaitos. ISBN 951-726-372-4, TIEL 2140011.

Tran, N. H., Taylor, A., & Willis, R. 2012. *Effect of rejuvenator on performance properties of HMA mixtures with high RAP and RAS contents*. Auburn, AL: National Center for Asphalt Technology. NCAT Report 12-05.

Traxler, R. N. 1936. *The Physical Chemistry of Asphaltic Bitumen*. Chemical reviews. Vol. 19:2. S. 119-143. DOI 10.1021/cr60063a002.

Van der Poel, C. 1954. *A General System Describing the Visco-elastic properties of bitumens and its relation to routine test data*. Journal of Applied Chemistry. Vol. 4:5. S. 221-236.

Wastimo E. 1995. *Asfaltti- ja kevytpäällysteiden uudelleenkäyttö 1973-1995*. Asfaltti. Vol. 56. S. 20-30.

Williams, M. L., Landel, R. F., & Ferry, J. D. 1955. The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids. *Journal of the American Chemical Society*. Vol. 77:14. S. 3701-3707. DOI: 10.1021/ja01619a008.

Yusoff, N. I. 2012. *Modelling the Linear Viscoelastic Rheological Properties of Bituminous Binders*. Väitöskirja. University of Nottingham. 232 s.

Yusoff, N. I. M., Shaw, M. T., & Airey, G. D. 2011. *Modelling the linear viscoelastic rheological properties of bituminous binders*. *Construction and Building Materials*. Vol. 25:5. S. 2171-2189. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.086

Zaumanis, M., & Mallick, R. B. 2013. *Finite element modeling of rejuvenator diffusion in RAP binder film—simulation of plant mixing process*. *Multi-Scale Modeling and Characterization of Infrastructure Materials: Proceedings of the International RILEM Symposium Stockholm, June 2013*. S. 407-419. ISBN 978-94-007-6877-2.

Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R. 2014. *Evaluation of different recycling agents for restoring aged asphalt binder and performance of 100% recycled asphalt*. *Materials and Structures*. Vol. 48:8. S. 2475-2488. ISSN 1359-5997.

Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R. 2014. *100% Recycled hot mix asphalt: a review and analysis*. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 92. S. 230-245. DOI 10.1016/j.resconrec.2014.07.007.

Zaumanis, M., & Mallick, R. B. 2015. *Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of the art*. *International Journal of Pavement Engineering*. Vol. 16:1. S. 39-55. DOI 10.1080/10298436.2014.893331.

Liitteet

Liite A. Reometrin mittausgeometrioiden PP08 ja PP25 välisen toistettavuuden arviointi taajuuspyyhkäisyssä.

Liite B. Taajuuspyyhkäisymittausten tulokset taajudella 1,78 Hz.

Liite C. WLF-yhtälön parametrit siirtokertoimen laskennassa.

Liite D. LAS-testin tulokset.

Liite E. MSCR-testin tulokset.

Liite F. Vanhenemisindeksien arvot taajuudella 1,78 Hz eri lämpötiloissa.

Liite G. Vaihekulmien erot samassa jäykkyydessä.

Liite H. G-R-parametrin arvot.

Liite A: Reometrin mittausgeometrioiden PP08 ja PP25 välisen toistettavuuden arviointi taajuuspyyhkäisyssä.

Taajuuspyyhkäisy mittaukset tehtiin kahdella eri mittausgeometrialla, jotka olivat 8 mm levy-levy-geometria (PP08) sekä 25 mm levy-levy-geometria (PP25). PP08-mittausgeometriaa käytettiin lämpötilavälillä 0...40 °C ja PP25-mittausgeometriaa lämpötilavälillä 30...90 °C. Lämpötiloissa 30 ja 40 °C mittaukset tehtiin molemmilla mittausgeometrioilla, joiden avulla todennettiin mittaustulosten yhtenevyys. Standardin (SFS-EN 14770) mukaan eri geometrioilla samoissa pisteissä mitatut kompleksimoduulin arvot eivät saa poiketa niiden keskiarvosta yli 15 %. Vastaavasti, mitatut vaihekulmat eivät saa erota niiden välisestä keskiarvosta yli kolmea astetta. Taulukkoon A.1 on laskettu kahdella eri mittausgeometrialla mitatut kompleksimoduulien ja vaihekulmien väliset erot lämpötiloissa 30 ja 40 °C taajuudella 1,78 Hz. Taulukkoon lasketut arvot on verrattu mittausgeometrian PP08 arvoihin. Taulukosta nähdään, että eri mittausgeometrioiden erot ovat hyväksyttäviä kaikilla näytteillä, koska erot ovat selvästi alle raja-arvojen. Mittausgeometria PP08 näyttää tuottavan systemaattisesti suurempia kompleksimoduulin arvoja kuin mittausgeometria PP25 lämpötilassa 30 °C, mutta suhteelliset erot vielä pienyvät lämpötilassa 40 °C. Suurimmat erot ovat selvästi liuotinta sisältävät näytteet 2AA, 3AA ja 4AA. Vaihekulmat eri mittausgeometrioiden välillä ovat molemmilla lämpötiloilla hyvin lähellä toisiaan. Vastaavanlainen tarkastelu tehtiin myös kaikille muille mittauksien taajuuksille ja yksittäisiä selviä mittapistevirheitä lukuun ottamatta kaikki pisteet olivat alle raja-arvojen. Eri mittausgeometrioilla mitattuja tuloksia voidaan siis pitää tarpeeksi yhtenevinä, jolloin niiden mittaustuloksia voidaan yhdistää.

Taulukko A. 1. Mittausgeometrioiden erot kompleksimoduuli-arvoissa ja vaihekulmissa lämpötiloissa 30 °C ja 40 °C taajuudella 1,78 Hz.

Näyte	$(G_{8mm}^* - G_{av.}^*) / G_{av.}^* [\%]$		$\delta_{8mm} - \delta_{av.} [^\circ]$	
	30 °C	40 °C	30 °C	40 °C
1AA	7,0 %	1,8 %	-0,28	0,19
1AC	5,6 %	2,2 %	-0,44	0,06
1BA	7,1 %	4,1 %	-0,31	0,01
1BC	6,4 %	3,9 %	-0,48	-0,04
1R	4,5 %	1,7 %	-0,26	0,02
1FA	6,6 %	2,2 %	-0,35	-0,02
1FB	4,1 %	0,2 %	-0,27	0,18
1FC	6,3 %	2,5 %	-0,31	-0,09
1GA	4,9 %	1,4 %	-0,23	0,00
1GC	4,9 %	0,1 %	-0,23	-0,05
2AA	10,4 %	6,3 %	-0,28	0,02
2AC	8,0 %	4,7 %	-0,30	-0,04
2BA	7,9 %	4,1 %	-0,17	-0,06
2BC	9,1 %	5,8 %	-0,37	-0,20
2CA	6,1 %	3,1 %	-0,31	-0,04
2CC	6,9 %	4,2 %	-0,40	-0,11
2DA	5,5 %	3,0 %	-0,05	-0,13
2DB	3,6 %	0,0 %	-0,46	-0,02
2DC	6,3 %	4,8 %	-0,16	-0,23
2R	6,7 %	5,2 %	-0,46	-0,08
2FA	4,5 %	1,4 %	-0,40	-0,05
2FC	6,1 %	2,7 %	-0,01	0,00
2GA	8,2 %	4,5 %	-0,15	0,04

Näyte	$(G^*_{8mm}-G^*_{av.})/G^*_{av.} [\%]$		$\delta_{8mm}-\delta_{av.} [^\circ]$	
	30 °C	40 °C	30 °C	40 °C
2GC	6,5 %	2,2 %	-0,31	-0,01
3AA	8,7 %	4,7 %	-0,33	0,05
3AC	4,5 %	1,0 %	-0,22	0,09
3BA	4,7 %	1,0 %	-0,21	0,11
3BC	4,5 %	0,4 %	-0,08	0,12
3R	4,5 %	0,6 %	0,06	0,16
3FA	2,2 %	-0,9 %	-0,10	0,17
3FC	2,8 %	-1,3 %	-0,20	0,09
3GA	2,1 %	-2,0 %	-0,02	0,21
3GC	2,7 %	-1,0 %	-0,20	0,11
4AA	13,8 %	8,0 %	-0,59	-0,05
4AC	7,3 %	4,8 %	-0,41	-0,03
4BA	6,5 %	3,3 %	-0,19	-0,08
4BC	7,3 %	4,3 %	-0,54	-0,08
4R	5,4 %	2,3 %	-0,28	0,10
4FA	5,8 %	2,7 %	-0,21	0,09
4FC	4,5 %	2,0 %	-0,19	0,05
4GA	6,2 %	2,8 %	-0,37	-0,05
4GC	7,0 %	3,5 %	-0,33	-0,15
70/100-RTFOT	-2,0 %	0,0 %	0,17	0,22
70/100	-6,5 %	-1,4 %	0,36	0,28

Liite B: Taajuuspyyhkäisymittausten tulokset taajuudella 1,78 Hz.

Näyte	Geom.	T	G*	δ
		[°C]	[Pa]	[°]
1AA	8mm	0	3,37E+07	33,16
	8mm	10	8,57E+06	42,78
	8mm	20	1,68E+06	54,12
	8mm	25	6,91E+05	59,43
	25mm	30	2,43E+05	64,9
	25mm	40	4,95E+04	72,39
	25mm	50	1,02E+04	79,11
	25mm	60	2,41E+03	84,15
	25mm	70	6,96E+02	87,16
	25mm	80	2,29E+02	89,04
	25mm	90	8,71E+01	89,82
	25mm	90	8,71E+01	89,82
1AC	8mm	0	6,56E+07	27,39
	8mm	10	2,00E+07	35,68
	8mm	20	4,55E+06	46,68
	8mm	25	1,95E+06	52,66
	25mm	30	7,24E+05	59,12
	25mm	40	1,38E+05	67,74
	25mm	50	2,69E+04	75,35
	25mm	60	6,02E+03	81,42
	25mm	70	1,56E+03	85,45
	25mm	80	4,67E+02	87,78
	25mm	90	1,65E+02	89,23
	25mm	90	1,65E+02	89,23
1BA	8mm	0	9,67E+07	24,4
	8mm	10	3,23E+07	32,24
	8mm	20	8,68E+06	41,73
	8mm	25	4,05E+06	47,22
	25mm	30	1,57E+06	53,34
	25mm	40	3,21E+05	62,5
	25mm	50	6,40E+04	70,69
	25mm	60	1,38E+04	77,86
	25mm	70	3,35E+03	83,22
	25mm	80	9,17E+02	86,64
	25mm	90	3,00E+02	88,79
	25mm	90	3,00E+02	88,79
1BC	8mm	0	9,17E+07	24,36
	8mm	10	3,10E+07	31,89
	8mm	20	8,22E+06	41,5
	8mm	25	3,80E+06	47,22
	25mm	30	1,48E+06	53,87
	25mm	40	2,97E+05	63,01
	25mm	50	5,86E+04	71,23
	25mm	60	1,27E+04	78,32
	25mm	70	3,13E+03	83,5
	25mm	80	8,66E+02	86,76
	25mm	90	2,87E+02	88,67
	25mm	90	2,87E+02	88,67

Näyte	Geom.	T	G*	δ
		[°C]	[Pa]	[°]
1R	8mm	0	9,85E+07	24,14
	8mm	10	3,32E+07	31,84
	8mm	20	9,06E+06	41
	8mm	25	4,30E+06	46,3
	8mm	30	1,96E+06	51,63
	25mm	40	3,82E+05	61,01
	25mm	50	7,87E+04	68,99
	25mm	60	1,76E+04	76,12
	25mm	70	4,24E+03	81,89
	25mm	80	1,16E+03	85,69
	25mm	90	3,72E+02	88,01
	25mm	90	3,72E+02	88,01
1FA	8mm	0	7,43E+07	27,19
	8mm	10	2,23E+07	35,9
	8mm	20	5,34E+06	46,11
	8mm	25	2,41E+06	51,47
	25mm	30	9,22E+05	57,31
	25mm	40	1,86E+05	65,59
	25mm	50	3,71E+04	73,18
	25mm	60	8,28E+03	79,69
	25mm	70	2,10E+03	84,34
	25mm	80	6,03E+02	87,18
	25mm	90	2,04E+02	88,73
	25mm	90	2,04E+02	88,73
1FB	8mm	0	6,94E+07	27,43
	8mm	10	2,04E+07	36,05
	8mm	20	4,76E+06	46,61
	8mm	25	2,07E+06	52,34
	8mm	30	8,74E+05	57,72
	25mm	40	1,60E+05	66,53
	25mm	50	3,18E+04	74,01
	25mm	60	7,19E+03	80,3
	25mm	70	1,85E+03	84,68
	25mm	80	5,44E+02	87,38
	25mm	90	1,88E+02	89,03
	25mm	90	1,88E+02	89,03
1FC	8mm	0	6,10E+07	28,27
	8mm	10	1,82E+07	36,57
	8mm	20	4,18E+06	47,3
	8mm	25	1,82E+06	52,98
	25mm	30	6,80E+05	58,82
	25mm	40	1,36E+05	67,22
	25mm	50	2,72E+04	74,71
	25mm	60	6,16E+03	80,91
	25mm	70	1,59E+03	85,13
	25mm	80	4,82E+02	87,6
	25mm	90	1,69E+02	88,96
	25mm	90	1,69E+02	88,96

Näyte	Geom. T	G*	δ
	[°C]	[Pa]	[°]
1GA	8mm	0 7,42E+07	26,93
	8mm	10 2,28E+07	35,21
	8mm	20 5,49E+06	45,35
	8mm	25 2,47E+06	50,79
	25mm	30 9,69E+05	56,46
	25mm	40 1,97E+05	64,99
	25mm	50 3,98E+04	72,61
	25mm	60 8,82E+03	79,29
	25mm	70 2,22E+03	84,1
	25mm	80 6,48E+02	87,07
	25mm	90 2,19E+02	88,76
1GC	8mm	0 5,79E+07	28,71
	8mm	10 1,67E+07	37,18
	8mm	20 3,76E+06	47,79
	8mm	25 1,62E+06	53,33
	25mm	30 6,17E+05	58,84
	25mm	40 1,26E+05	67,03
	25mm	50 2,55E+04	74,47
	25mm	60 5,83E+03	80,75
	25mm	70 1,53E+03	85,03
	25mm	80 4,62E+02	87,64
	25mm	90 1,62E+02	89,16
2AA	8mm	0 6,74E+07	26,14
	8mm	10 2,27E+07	33,19
	8mm	20 6,07E+06	42,11
	8mm	25 2,86E+06	47,24
	25mm	30 1,05E+06	53,02
	25mm	40 2,26E+05	62,13
	25mm	50 4,75E+04	70,29
	25mm	60 1,07E+04	77,61
	25mm	70 2,59E+03	83,17
	25mm	80 7,40E+02	86,5
	25mm	90 2,41E+02	88,33
2AC	8mm	0 1,01E+08	23
	8mm	10 3,68E+07	29,73
	8mm	20 1,06E+07	38,26
	8mm	25 5,15E+06	43,43
	25mm	30 2,03E+06	49,43
	25mm	40 4,43E+05	59
	25mm	50 9,34E+04	67,45
	25mm	60 2,06E+04	75,08
	25mm	70 4,94E+03	81,27
	25mm	80 1,33E+03	85,42
	25mm	90 4,14E+02	88,01

Näyte	Geom. T	G*	δ
	[°C]	[Pa]	[°]
2BA	8mm	0 1,01E+08	22,72
	8mm	10 3,65E+07	29,43
	8mm	20 1,06E+07	37,62
	8mm	25 5,25E+06	42,46
	8mm	30 2,46E+06	47,6
	25mm	40 4,70E+05	57,51
	25mm	50 1,01E+05	65,92
	25mm	60 2,26E+04	73,64
	25mm	70 5,47E+03	80,13
	25mm	80 1,43E+03	84,77
	25mm	90 4,40E+02	87,47
2BC	8mm	0 8,79E+07	23,41
	8mm	10 3,13E+07	29,85
	8mm	20 8,96E+06	38,07
	8mm	25 4,35E+06	43,08
	25mm	30 1,67E+06	49,09
	25mm	40 3,61E+05	58,7
	25mm	50 7,69E+04	67,08
	25mm	60 1,73E+04	74,73
	25mm	70 4,27E+03	80,92
	25mm	80 1,16E+03	85,15
	25mm	90 3,60E+02	87,67
2CA	8mm	0 1,20E+08	21,41
	8mm	10 4,59E+07	28,05
	8mm	20 1,41E+07	36,07
	8mm	25 7,20E+06	40,76
	8mm	30 3,49E+06	45,8
	25mm	40 7,26E+05	55,59
	25mm	50 1,58E+05	64,13
	25mm	60 3,51E+04	72,08
	25mm	70 8,32E+03	78,93
	25mm	80 2,11E+03	83,97
	25mm	90 6,29E+02	86,96
2CC	8mm	0 1,13E+08	21,63
	8mm	10 4,30E+07	27,98
	8mm	20 1,35E+07	35,71
	8mm	25 6,89E+06	40,43
	8mm	30 3,36E+06	45,54
	25mm	40 6,75E+05	55,66
	25mm	50 1,47E+05	64,23
	25mm	60 3,31E+04	72,16
	25mm	70 7,94E+03	78,93
	25mm	80 2,04E+03	83,82
	25mm	90 6,12E+02	86,77

Näyte	Geom.	T	G*	δ
		[°C]	[Pa]	[°]
2DA	8mm	0	9,10E+07	23,96
	8mm	10	3,11E+07	31,22
	8mm	20	8,59E+06	39,79
	8mm	25	4,12E+06	44,67
	25mm	30	1,69E+06	49,79
	25mm	40	3,65E+05	59,24
	25mm	50	7,63E+04	67,43
	25mm	60	1,70E+04	74,88
	25mm	70	4,15E+03	81,01
	25mm	80	1,11E+03	85,19
	25mm	90	3,51E+02	87,51
2DB	8mm	0	1,03E+08	22,32
	8mm	10	3,73E+07	28,87
	8mm	20	1,07E+07	37,07
	8mm	25	5,24E+06	42,11
	25mm	30	2,25E+06	48,34
	25mm	40	4,92E+05	57,43
	25mm	50	1,04E+05	65,83
	25mm	60	2,30E+04	73,62
	25mm	70	5,51E+03	80,16
	25mm	80	1,46E+03	84,73
	25mm	90	4,44E+02	87,5
2DC	8mm	0	8,51E+07	23,65
	8mm	10	2,97E+07	30,22
	8mm	20	8,41E+06	38,41
	8mm	25	4,10E+06	43,3
	25mm	30	1,68E+06	48,72
	25mm	40	3,65E+05	58,31
	25mm	50	7,88E+04	66,66
	25mm	60	1,79E+04	74,4
	25mm	70	4,35E+03	80,81
	25mm	80	1,17E+03	85,11
	25mm	90	3,65E+02	87,65
2R	8mm	0	1,20E+08	21,61
	8mm	10	4,50E+07	28,06
	8mm	20	1,37E+07	35,77
	8mm	25	7,06E+06	40,13
	8mm	30	3,49E+06	44,74
	25mm	40	7,40E+05	53,82
	25mm	50	1,74E+05	61,73
	25mm	60	4,13E+04	69,46
	25mm	70	1,03E+04	76,5
	25mm	80	2,71E+03	82,1
	25mm	90	7,82E+02	85,93

Näyte	Geom.	T	G*	δ
		[°C]	[Pa]	[°]
2FA	8mm	0	8,01E+07	25,65
	8mm	10	2,57E+07	33,47
	8mm	20	6,54E+06	43,09
	8mm	25	3,00E+06	48,46
	25mm	30	1,21E+06	54,47
	25mm	40	2,53E+05	62,89
	25mm	50	5,19E+04	70,55
	25mm	60	1,17E+04	77,35
	25mm	70	2,96E+03	82,69
	25mm	80	8,32E+02	86,25
	25mm	90	2,74E+02	88,34
2FC	8mm	0	8,35E+07	24,89
	8mm	10	2,83E+07	32,1
	8mm	20	7,50E+06	41,35
	8mm	25	3,48E+06	46,76
	25mm	30	1,37E+06	52,13
	25mm	40	2,87E+05	61,49
	25mm	50	5,99E+04	69,31
	25mm	60	1,37E+04	76,25
	25mm	70	3,42E+03	81,93
	25mm	80	9,52E+02	85,74
	25mm	90	3,11E+02	88,02
2GA	8mm	0	8,69E+07	25,18
	8mm	10	2,89E+07	32,88
	8mm	20	7,48E+06	42,5
	8mm	25	3,43E+06	48,03
	25mm	30	1,28E+06	53,74
	25mm	40	2,64E+05	62,78
	25mm	50	5,36E+04	70,35
	25mm	60	1,22E+04	76,97
	25mm	70	3,05E+03	82,41
	25mm	80	8,62E+02	86,06
	25mm	90	2,85E+02	88,32
2GC	8mm	0	8,44E+07	25,23
	8mm	10	2,73E+07	32,94
	8mm	20	7,16E+06	42,38
	8mm	25	3,28E+06	47,92
	25mm	30	1,26E+06	54,05
	25mm	40	2,58E+05	62,79
	25mm	50	5,29E+04	70,32
	25mm	60	1,18E+04	77,05
	25mm	70	2,95E+03	82,37
	25mm	80	8,40E+02	85,9
	25mm	90	2,74E+02	88,29

Näyte	Geom.	T	G*	δ
		[°C]	[Pa]	[°]
3AA	8mm	0	5,34E+07	31,02
	8mm	10	1,48E+07	40,23
	8mm	20	3,39E+06	50,33
	8mm	25	1,51E+06	55,23
	25mm	30	5,53E+05	60,37
	25mm	40	1,20E+05	67,34
	25mm	50	2,57E+04	73,97
	25mm	60	6,09E+03	79,91
	25mm	70	1,66E+03	84,29
	25mm	80	5,12E+02	87,24
	25mm	90	1,87E+02	89,1
	25mm	90	1,87E+02	89,1
3AC	8mm	0	7,72E+07	27,85
	8mm	10	2,27E+07	36,95
	8mm	20	5,44E+06	47,29
	8mm	25	2,43E+06	52,65
	25mm	30	9,69E+05	57,96
	25mm	40	2,02E+05	65,65
	25mm	50	4,22E+04	72,56
	25mm	60	9,73E+03	78,72
	25mm	70	2,53E+03	83,45
	25mm	80	7,51E+02	86,51
	25mm	90	2,56E+02	88,79
	25mm	90	2,56E+02	88,79
3BA	8mm	0	7,00E+07	28,83
	8mm	10	1,99E+07	38,09
	8mm	20	4,59E+06	48,28
	8mm	25	2,05E+06	53,3
	25mm	30	8,23E+05	58,27
	25mm	40	1,77E+05	65,08
	25mm	50	3,80E+04	71,19
	25mm	60	9,01E+03	77,16
	25mm	70	2,40E+03	82,21
	25mm	80	7,29E+02	85,78
	25mm	90	2,54E+02	88,17
	25mm	90	2,54E+02	88,17
3BC	8mm	0	6,70E+07	29,35
	8mm	10	1,91E+07	38,54
	8mm	20	4,44E+06	48,61
	8mm	25	1,98E+06	53,57
	25mm	30	8,00E+05	58,18
	25mm	40	1,73E+05	65,39
	25mm	50	3,71E+04	71,81
	25mm	60	8,78E+03	77,85
	25mm	70	2,34E+03	82,66
	25mm	80	7,15E+02	86,14
	25mm	90	2,46E+02	88,22
	25mm	90	2,46E+02	88,22

Näyte	Geom.	T	G*	δ
		[°C]	[Pa]	[°]
3R	8mm	0	8,98E+07	26,51
	8mm	10	2,76E+07	35,22
	8mm	20	6,70E+06	45,02
	8mm	25	3,10E+06	49,9
	8mm	30	1,41E+06	54,47
	25mm	40	2,94E+05	61,88
	25mm	50	6,56E+04	68,36
	25mm	60	1,56E+04	74,66
	25mm	70	4,09E+03	80,18
	25mm	80	1,22E+03	84,26
	25mm	90	4,01E+02	87,11
	25mm	90	4,01E+02	87,11
3FA	8mm	0	6,90E+07	29,28
	8mm	10	1,97E+07	39,05
	8mm	20	4,42E+06	49,79
	8mm	25	1,96E+06	54,88
	25mm	30	8,16E+05	59,67
	25mm	40	1,73E+05	66,62
	25mm	50	3,63E+04	72,7
	25mm	60	8,44E+03	78,47
	25mm	70	2,26E+03	83,11
	25mm	80	6,87E+02	86,46
	25mm	90	2,38E+02	88,38
	25mm	90	2,38E+02	88,38
3FC	8mm	0	6,59E+07	29,37
	8mm	10	1,81E+07	39,32
	8mm	20	3,99E+06	50,15
	8mm	25	1,74E+06	55,33
	25mm	30	7,08E+05	60,32
	25mm	40	1,48E+05	67,21
	25mm	50	3,12E+04	73,34
	25mm	60	7,50E+03	78,91
	25mm	70	2,03E+03	83,41
	25mm	80	6,20E+02	86,46
	25mm	90	2,20E+02	88,36
	25mm	90	2,20E+02	88,36
3GA	8mm	0	7,40E+07	28,36
	8mm	10	2,11E+07	37,94
	8mm	20	4,90E+06	48,36
	8mm	25	2,17E+06	53,52
	25mm	30	9,07E+05	58,26
	25mm	40	1,92E+05	65,74
	25mm	50	4,03E+04	72,45
	25mm	60	9,36E+03	78,56
	25mm	70	2,43E+03	83,27
	25mm	80	7,30E+02	86,41
	25mm	90	2,51E+02	88,42
	25mm	90	2,51E+02	88,42

Näyte	Geom.	T	G*	δ
		[°C]	[Pa]	[°]
3GC	8mm	0	7,00E+07	28,62
	8mm	10	2,07E+07	37,63
	8mm	20	4,87E+06	47,83
	8mm	25	2,17E+06	52,97
	25mm	30	8,98E+05	58,08
	25mm	40	1,91E+05	65,49
	25mm	50	4,00E+04	72,35
	25mm	60	9,19E+03	78,56
	25mm	70	2,36E+03	83,35
	25mm	80	7,13E+02	86,49
	25mm	90	2,44E+02	88,52
4AA	8mm	0	6,18E+07	28,6
	8mm	10	1,76E+07	37,62
	8mm	20	3,84E+06	49,03
	8mm	25	1,61E+06	55,05
	25mm	30	4,94E+05	61,84
	25mm	40	9,41E+04	70,33
	25mm	50	1,81E+04	77,59
	25mm	60	4,06E+03	83,16
	25mm	70	1,10E+03	86,54
	25mm	80	3,42E+02	88,48
	25mm	90	1,27E+02	89,77
4AC	8mm	0	8,29E+07	25,6
	8mm	10	2,68E+07	33,57
	8mm	20	6,53E+06	44,16
	8mm	25	2,88E+06	50,32
	25mm	30	1,05E+06	57,09
	25mm	40	1,96E+05	66,48
	25mm	50	3,67E+04	74,5
	25mm	60	7,99E+03	80,86
	25mm	70	1,97E+03	85,19
	25mm	80	5,71E+02	87,74
	25mm	90	1,96E+02	89,54
4BA	8mm	0	7,89E+07	26
	8mm	10	2,51E+07	34,26
	8mm	20	5,99E+06	45,09
	8mm	25	2,61E+06	51,25
	25mm	30	9,58E+05	57,51
	25mm	40	1,80E+05	67,18
	25mm	50	3,38E+04	75,08
	25mm	60	7,24E+03	81,32
	25mm	70	1,80E+03	85,44
	25mm	80	5,33E+02	87,82
	25mm	90	1,82E+02	89,43

Näyte	Geom.	T	G*	δ
		[°C]	[Pa]	[°]
4BC	8mm	0	7,85E+07	25,98
	8mm	10	2,44E+07	34,19
	8mm	20	5,75E+06	45,1
	8mm	25	2,48E+06	51,39
	25mm	30	8,83E+05	58,44
	25mm	40	1,62E+05	67,54
	25mm	50	3,07E+04	75,37
	25mm	60	6,71E+03	81,54
	25mm	70	1,69E+03	85,57
	25mm	80	4,99E+02	87,94
	25mm	90	1,73E+02	89,39
4R	8mm	0	9,08E+07	24,74
	8mm	10	2,98E+07	32,77
	8mm	20	7,80E+06	42,25
	8mm	25	3,64E+06	47,47
	8mm	30	1,64E+06	52,64
	25mm	40	3,19E+05	61,66
	25mm	50	6,67E+04	69,44
	25mm	60	1,48E+04	76,64
	25mm	70	3,65E+03	82,22
	25mm	80	1,00E+03	85,99
	25mm	90	3,22E+02	88,26
4FA	8mm	0	7,89E+07	26,17
	8mm	10	2,56E+07	34,04
	8mm	20	6,51E+06	43,6
	8mm	25	3,01E+06	48,82
	25mm	30	1,20E+06	54,37
	25mm	40	2,55E+05	62,93
	25mm	50	5,28E+04	70,69
	25mm	60	1,16E+04	77,72
	25mm	70	2,88E+03	83,05
	25mm	80	8,22E+02	86,39
	25mm	90	2,68E+02	88,39
4FC	8mm	0	7,77E+07	26,03
	8mm	10	2,54E+07	33,63
	8mm	20	6,51E+06	43,07
	8mm	25	3,01E+06	48,37
	25mm	30	1,22E+06	53,92
	25mm	40	2,54E+05	62,66
	25mm	50	5,19E+04	70,62
	25mm	60	1,18E+04	77,62
	25mm	70	2,91E+03	83,01
	25mm	80	8,25E+02	86,4
	25mm	90	2,73E+02	88,31

Näyte	Geom.	T	G*	δ
		[°C]	[Pa]	[°]
4GA	8mm	0	8,44E+07	25,77
	8mm	10	2,71E+07	33,97
	8mm	20	6,76E+06	44,05
	8mm	25	3,06E+06	49,66
	25mm	30	1,17E+06	55,86
	25mm	40	2,34E+05	64,75
	25mm	50	4,57E+04	72,67
	25mm	60	9,99E+03	79,42
	25mm	70	2,47E+03	84,22
	25mm	80	6,96E+02	87,17
	25mm	90	2,36E+02	88,83
	25mm	90	2,36E+02	88,83
4GC	8mm	0	8,23E+07	25,62
	8mm	10	2,62E+07	33,59
	8mm	20	6,53E+06	43,57
	8mm	25	2,96E+06	49,23
	25mm	30	1,12E+06	55,35
	25mm	40	2,21E+05	64,51
	25mm	50	4,34E+04	72,49
	25mm	60	9,62E+03	79,27
	25mm	70	2,41E+03	84,08
	25mm	80	6,88E+02	87,02
	25mm	90	2,32E+02	88,89
	25mm	90	2,32E+02	88,89
650/900	25mm	0	3,39E+06	62,16
	25mm	10	4,20E+05	72,84
	25mm	20	4,35E+04	80,47
	25mm	25	1,45E+04	83,05
	25mm	30	4,99E+03	85
	25mm	40	7,91E+02	86,5
	25mm	50	1,97E+02	89,51
	25mm	60	6,63E+01	89,72
	25mm	70	2,72E+01	90
70/100-RTFOT	8mm	-10	1,58E+08	21,77
	8mm	0	5,42E+07	30,77
	8mm	10	1,47E+07	40,49
	8mm	20	3,10E+06	51,68
	8mm	25	1,33E+06	56,94
	25mm	30	5,76E+05	61,6
	25mm	40	9,98E+04	70,29
	25mm	50	1,87E+04	77,45
	25mm	60	3,99E+03	83,02
	25mm	70	1,02E+03	86,56
	25mm	80	3,06E+02	88,56
	25mm	90	1,11E+02	90
	25mm	90	1,11E+02	90
	25mm	90	1,11E+02	90

Näyte	Geom.	T	G*	δ
		[°C]	[Pa]	[°]
70/100	8mm	-10	1,46E+08	23,53
	8mm	0	4,49E+07	34,6
	8mm	10	1,01E+07	47,23
	8mm	20	1,70E+06	59,81
	8mm	25	6,50E+05	65,41
	25mm	30	2,83E+05	69,54
	25mm	40	4,17E+04	77,58
	25mm	50	7,53E+03	83,15
	25mm	60	1,67E+03	86,44
	25mm	70	4,68E+02	88,46
	25mm	80	1,55E+02	89,64
	25mm	90	6,23E+01	90
	25mm	90	6,23E+01	90
	25mm	90	6,23E+01	90
	25mm	90	6,23E+01	90

Liite C: WLF-yhtälön parametrit siirtokertoimen laskennassa.

Taulukko C. 1. Kaikkien bituminäytteiden siirtokertoimen a_T WLF-yhtälön parametrikertoimet.

Näyte	aT (WLF)			Näyte	aT (WLF)		
	T _{ref}	C ₁	C ₂		T _{ref}	C ₁	C ₂
1AA	292,2	14,21	111,66	3AA	292,2	15,48	122,28
1AC	292,2	16,55	122,30	3AC	292,4	16,84	129,71
1BA	292,3	18,47	133,88	3BA	292,6	16,90	131,56
1BC	292,2	18,18	130,99	3BC	292,5	16,73	131,16
1R	292,5	18,69	137,25	3R	292,7	17,69	135,39
1FA	292,4	17,21	129,28	3FA	292,6	16,81	134,09
1FB	292,4	16,47	123,20	3FC	292,6	16,02	125,93
1FC	292,2	16,08	120,40	3GA	292,6	16,72	130,73
1GA	292,4	17,21	127,95	3GC	292,5	17,00	132,60
1GC	292,3	16,25	122,12	4AA	292,1	15,83	116,83
2AA	292,0	18,13	133,12	4AC	292,1	17,23	124,55
2AC	292,1	19,03	134,81	4BA	292,2	17,08	124,42
2BA	292,3	19,79	140,37	4BC	292,1	16,80	120,50
2BC	292,0	19,00	132,97	4R	292,5	18,38	135,98
2CA	292,4	20,76	148,52	4FA	292,3	17,86	133,44
2CC	292,3	20,50	145,77	4FC	292,3	17,95	133,18
2DA	292,3	18,91	135,72	4GA	292,3	17,85	131,47
2DB	292,2	19,33	134,94	4GC	292,2	17,87	129,66
2DC	292,1	18,94	133,66	70/100	292,6	16,14	137,41
2R	292,5	20,71	147,70	70/100-RTFOT	292,7	17,62	144,17
2FA	292,3	17,69	130,08	650/900	292,5	19,18	167,32
2FC	292,1	18,17	131,25	Keksiarvo		17,69	132,00
2GA	292,1	17,98	130,42	Keskihajonta		1,39	9,27
2GC	292,2	17,83	129,33	Variaatiokerroin		7,84 %	7,02 %

Liite D: LAS-testin tulokset.

$$N_f = A(\gamma_{max})^{-B}$$

Taulukko D. 1. LAS-testin tulosten perusteella lasketut väsymisvaurioparametrit maksimivienymillä 2,5 ja 5 % sekä näiden laskemiseen käytetyt VECD-analyysillä määritetyt parametrit A ja B. Mittaus on tehty lämpötilassa T = 10 °C.

Näyte	A	B	$N_f(2,5\%)$	$N_f(5\%)$
1AA	4,282E+05	-3,967	11295	722
1AC	2,334E+06	-4,776	29345	1071
1BA	3,100E+06	-5,380	22409	538
1BC	7,337E+06	-5,372	53439	1291
1R	3,103E+06	-5,459	20875	475
1FA	2,160E+06	-4,778	27102	988
1FB	1,668E+06	-4,763	21229	782
1FC	2,406E+06	-4,672	33272	1305
1GA	1,974E+06	-4,851	23167	803
1GC	2,196E+06	-4,590	32736	1359
2AA	4,362E+06	-5,158	38631	1082
2AC	1,204E+07	-5,795	59496	1071
2BA	7,238E+06	-5,935	31455	514
2BC	9,933E+06	-5,833	47396	831
2CA	6,874E+05	-6,210	2323	31
2CC	1,022E+07	-6,255	33166	434
2DA	5,406E+06	-5,570	32833	691
2DB	2,595E+07	-6,041	102387	1555
2DC	7,810E+06	-5,781	39099	711
2R	1,386E+06	-6,223	4630	62
2FA	5,302E+06	-5,166	46643	1299
2FC	8,688E+06	-5,365	63696	1546
2GA	5,072E+06	-5,234	41912	1114
2GC	3,342E+06	-5,265	26833	698
3AA	9,480E+05	-4,243	19424	1026
3AC	1,229E+06	-4,644	17443	698
3BA	1,535E+06	-4,459	25808	1174
3BC	1,403E+06	-4,408	24729	1165
3R	1,430E+06	-4,868	16527	566
3FA	1,250E+06	-4,311	24054	1212
3FC	1,059E+06	-4,304	20519	1039
3GA	1,668E+06	-4,504	26916	1186
3GC	1,506E+06	-4,512	24101	1056
4AA	8,386E+05	-4,544	13040	559
4AC	4,010E+06	-5,080	38154	1128
4BA	2,150E+06	-5,015	21715	672
4BC	3,371E+06	-5,004	34385	1071
4R	5,913E+06	-5,284	46692	1199
4FA	2,195E+06	-5,025	21976	675
4FC	3,514E+06	-5,100	32817	957
4GA	2,297E+06	-5,051	22439	677
4GC	4,494E+06	-5,119	41266	1187
70/100	1,878E+05	-3,568	7141	602
70/100-RTFOT	4,395E+05	-4,218	9212	495
650/900	2,557E+05	-2,373	29064	5610

Liite E: MSCR-testin tulokset.

Taulukko E. 1. MSCR-testissä lasketut palautumattomat virumismyötäämiset eri jännityksillä sekä näiden erotusarvot lämpötilassa $T = 50\text{ °C}$.

Näyte	J_{nr100} (1/kPa)	J_{nr3200} (1/kPa)	J_{nr6400} (1/kPa)	$J_{nr,diff(3200-100)}$ (%)	$J_{nr,diff(6400-3200)}$ (%)	$J_{nr,diff(6400-100)}$ (%)
1AA	0,941	1,060	1,192	12,6 %	12,4 %	26,6 %
1AC	0,299	0,317	0,338	6,0 %	6,7 %	13,0 %
1BA	0,102	0,105	0,109	2,3 %	4,3 %	6,7 %
1BC	0,113	0,116	0,123	2,4 %	5,9 %	8,4 %
1R	0,078	0,080	0,084	2,1 %	4,7 %	6,9 %
1FA	0,210	0,223	0,248	6,2 %	10,9 %	17,8 %
1FB	0,253	0,268	0,289	5,8 %	7,9 %	14,1 %
1FC	0,244	0,261	0,293	7,0 %	12,3 %	20,2 %
1GA	0,184	0,194	0,212	5,3 %	9,3 %	15,1 %
1GC	0,246	0,265	0,305	8,0 %	15,1 %	24,3 %
2AA	0,142	0,149	0,164	4,7 %	10,2 %	15,4 %
2AC	0,058	0,058	0,061	1,5 %	3,9 %	5,5 %
2BA	0,050	0,050	0,052	1,1 %	3,0 %	4,2 %
2BC	0,066	0,067	0,072	2,0 %	6,5 %	8,6 %
2CA	0,028	0,028	0,028	0,5 %	1,0 %	1,5 %
2CC	0,029	0,030	0,030	0,5 %	1,7 %	2,3 %
2DA	0,072	0,073	0,078	2,2 %	6,8 %	9,1 %
2DB	0,033	0,033	0,035	2,7 %	5,1 %	7,9 %
2DC	0,066	0,067	0,072	2,5 %	6,9 %	9,6 %
2R	0,021	0,022	0,022	0,4 %	0,9 %	1,4 %
2FA	0,124	0,129	0,138	3,7 %	7,5 %	11,5 %
2FC	0,099	0,102	0,108	3,0 %	6,2 %	9,5 %
2GA	0,085	0,088	0,095	4,1 %	7,8 %	12,1 %
2GC	0,119	0,125	0,138	4,7 %	10,4 %	15,6 %
3AA	0,300	0,332	0,374	10,7 %	12,7 %	24,8 %
3AC	0,168	0,175	0,191	4,3 %	8,9 %	13,6 %
3BA	0,180	0,190	0,206	5,7 %	8,2 %	14,3 %
3BC	0,183	0,193	0,213	5,7 %	9,9 %	16,2 %
3R	0,085	0,088	0,094	3,0 %	6,4 %	9,6 %
3FA	0,200	0,211	0,228	5,6 %	8,3 %	14,4 %
3FC	0,232	0,249	0,275	7,4 %	10,4 %	18,5 %
3GA	0,177	0,186	0,198	4,8 %	6,9 %	12,1 %
3GC	0,147	0,155	0,168	5,2 %	8,7 %	14,3 %
4AA	0,479	0,522	0,585	8,9 %	12,1 %	22,1 %
4AC	0,153	0,162	0,181	6,1 %	11,4 %	18,1 %
4BA	0,238	0,247	0,260	4,0 %	5,2 %	9,5 %
4BC	0,261	0,279	0,305	6,8 %	9,6 %	17,0 %
4R	0,099	0,101	0,108	2,3 %	6,9 %	9,4 %
4FA	0,128	0,132	0,145	3,3 %	9,6 %	13,1 %
4FC	0,127	0,131	0,142	3,4 %	8,7 %	12,4 %
4GA	0,161	0,167	0,176	3,3 %	5,6 %	9,1 %
4GC	0,164	0,171	0,185	4,2 %	8,4 %	12,9 %
70/100	1,447	1,607	1,822	11,1 %	13,4 %	26,0 %
70/100-RTFOT	0,492	0,542	0,574	10,1 %	6,0 %	16,7 %
650/900	67,21	71,38	75,60	6,2 %	5,9 %	12,5 %

Taulukko E. 2. MSCR-testissä lasketut suhteelliset palautumaprosentit eri jännityksillä sekä näiden erotusarvot lämpötilassa T = 50 °C.

Näyte	R₁₀₀ (%) (%)	R₃₂₀₀ (%) (%)	R₆₄₀₀ (%) (%)	R_{diff(3200-100)} (%)	R_{diff(6400-3200)} (%)	R_{diff(6400-100)} (%)
1AA	10,5	4,2	1,8	59,8 %	57,9 %	83,1 %
1AC	18,0	14,0	9,5	21,9 %	32,6 %	47,4 %
1BA	27,7	25,9	22,7	6,6 %	12,4 %	18,2 %
1BC	26,7	24,7	21,3	7,3 %	14,0 %	20,3 %
1R	32,4	30,8	27,8	4,8 %	9,8 %	14,2 %
1FA	22,6	19,0	13,8	16,3 %	27,0 %	38,9 %
1FB	20,6	16,8	11,9	18,5 %	29,3 %	42,4 %
1FC	22,6	17,8	11,9	21,2 %	33,0 %	47,2 %
1GA	23,5	20,3	15,4	13,8 %	23,8 %	34,3 %
1GC	23,6	18,2	11,8	22,8 %	35,1 %	49,9 %
2AA	27,4	24,2	19,2	11,4 %	20,7 %	29,8 %
2AC	35,5	34,3	32,0	3,4 %	6,8 %	9,9 %
2BA	38,8	37,7	35,5	2,8 %	5,7 %	8,4 %
2BC	36,5	34,8	31,6	4,6 %	9,2 %	13,4 %
2CA	43,4	42,9	42,1	1,2 %	1,8 %	3,0 %
2CC	43,8	43,2	42,2	1,5 %	2,3 %	3,7 %
2DA	36,2	34,4	31,1	5,0 %	9,6 %	14,1 %
2DB	47,7	46,1	43,5	3,2 %	5,7 %	8,7 %
2DC	37,2	35,4	32,0	4,9 %	9,5 %	13,9 %
2R	50,2	49,8	49,3	0,7 %	1,0 %	1,7 %
2FA	29,0	26,4	22,1	9,2 %	16,1 %	23,8 %
2FC	32,1	29,8	26,0	7,1 %	12,7 %	18,9 %
2GA	36,1	33,5	28,9	7,3 %	13,7 %	20,0 %
2GC	30,6	27,9	23,4	8,8 %	16,1 %	23,5 %
3AA	21,5	16,4	10,8	23,4 %	34,5 %	49,8 %
3AC	25,5	22,6	18,0	11,2 %	20,4 %	29,3 %
3BA	29,0	25,4	20,1	12,5 %	20,7 %	30,5 %
3BC	27,8	24,2	18,9	12,8 %	22,0 %	32,0 %
3R	36,9	34,9	31,2	5,4 %	10,8 %	15,6 %
3FA	25,9	22,4	17,5	13,5 %	22,0 %	32,5 %
3FC	24,8	20,8	15,5	16,2 %	25,4 %	37,5 %
3GA	25,6	22,5	17,8	12,3 %	20,9 %	30,6 %
3GC	29,4	25,8	20,5	12,0 %	20,6 %	30,1 %
4AA	13,6	8,8	4,7	35,5 %	46,0 %	65,1 %
4AC	26,1	22,0	16,5	15,5 %	25,0 %	36,6 %
4BA	18,5	15,4	11,4	16,7 %	26,2 %	38,5 %
4BC	18,3	14,7	10,1	19,3 %	31,4 %	44,6 %
4R	30,6	28,7	25,0	6,4 %	12,9 %	18,5 %
4FA	27,7	25,2	20,8	8,9 %	17,3 %	24,7 %
4FC	27,7	25,3	21,0	8,8 %	17,1 %	24,4 %
4GA	23,1	20,5	16,5	11,1 %	19,5 %	28,5 %
4GC	23,9	21,0	16,6	12,1 %	21,3 %	30,8 %
70/100	7,7	1,6	0,3	79,2 %	83,1 %	96,5 %
70/100-RTFOT	16,4	9,1	5,0	44,3 %	45,1 %	69,4 %
650/900	-18,5	-20,4	-23,0	-10,1 %	-12,9 %	-24,3 %

Liite F: Vanhenemisindeksien arvot taajuudella 1,78 Hz eri lämpötiloissa.

Taulukko F. 1 Vanhenemisindeksin ($G^*_{\text{vanhentunut näyte}} / G^*_{70/100}$) arvot taajuudella 1,78 Hz eri lämpötiloissa.

Näyte	0°C [-]	10°C [-]	20°C [-]	25°C [-]	30°C [-]	40°C [-]	50°C [-]	60°C [-]	70°C [-]	80°C [-]	90°C [-]
1AA	0,75	0,85	0,99	1,06	0,86	1,19	1,35	1,44	1,49	1,48	1,40
1AC	1,46	1,98	2,68	3,00	2,56	3,32	3,57	3,60	3,33	3,01	2,65
1BA	2,15	3,20	5,12	6,23	5,54	7,71	8,50	8,21	7,15	5,91	4,81
1BC	2,04	3,06	4,84	5,84	5,22	7,13	7,79	7,60	6,70	5,58	4,61
1R	2,20	3,28	5,34	6,62	6,91	9,17	10,46	10,51	9,06	7,46	5,97
1FA	1,66	2,21	3,15	3,70	3,26	4,46	4,93	4,95	4,49	3,89	3,27
1FB	1,55	2,02	2,81	3,18	3,09	3,84	4,23	4,29	3,96	3,51	3,01
1FC	1,36	1,80	2,47	2,80	2,40	3,26	3,61	3,68	3,40	3,11	2,72
1GA	1,65	2,26	3,24	3,81	3,43	4,72	5,29	5,27	4,74	4,18	3,52
1GC	1,29	1,66	2,22	2,49	2,18	3,01	3,39	3,48	3,28	2,98	2,61
2AA	1,50	2,25	3,58	4,40	3,69	5,42	6,31	6,36	5,53	4,77	3,87
2AC	2,25	3,64	6,24	7,92	7,18	10,63	12,41	12,32	10,56	8,55	6,65
2BA	2,26	3,61	6,27	8,09	8,70	11,28	13,37	13,51	11,70	9,22	7,07
2BC	1,96	3,10	5,28	6,70	5,90	8,66	10,21	10,35	9,13	7,44	5,77
2CA	2,68	4,54	8,31	11,08	12,35	17,41	20,95	20,94	17,78	13,59	10,09
2CC	2,51	4,26	7,93	10,61	11,88	16,18	19,52	19,78	16,97	13,14	9,83
2DA	2,03	3,07	5,06	6,35	5,99	8,76	10,13	10,16	8,87	7,17	5,64
2DB	2,30	3,69	6,33	8,06	7,96	11,79	13,86	13,74	11,77	9,41	7,12
2DC	1,90	2,94	4,96	6,31	5,93	8,75	10,47	10,67	9,31	7,56	5,86
2R	2,67	4,46	8,05	10,87	12,35	17,76	23,09	24,64	21,94	17,45	12,56
2FA	1,78	2,54	3,85	4,62	4,29	6,06	6,89	6,98	6,32	5,36	4,40
2FC	1,86	2,80	4,42	5,35	4,84	6,90	7,96	8,17	7,32	6,13	4,99
2GA	1,94	2,86	4,41	5,28	4,53	6,34	7,11	7,29	6,52	5,55	4,57
2GC	1,88	2,71	4,22	5,05	4,44	6,18	7,02	7,02	6,32	5,41	4,40
3AA	1,19	1,47	2,00	2,32	1,95	2,88	3,41	3,64	3,56	3,30	3,00
3AC	1,72	2,25	3,21	3,74	3,42	4,84	5,60	5,81	5,40	4,84	4,11
3BA	1,56	1,97	2,70	3,16	2,91	4,25	5,05	5,38	5,12	4,70	4,08
3BC	1,49	1,89	2,62	3,05	2,83	4,15	4,92	5,25	5,01	4,61	3,95
3R	2,00	2,73	3,95	4,78	4,98	7,05	8,72	9,34	8,74	7,84	6,44
3FA	1,54	1,95	2,61	3,02	2,88	4,14	4,82	5,04	4,82	4,43	3,82
3FC	1,47	1,79	2,35	2,68	2,50	3,56	4,15	4,48	4,34	3,99	3,52
3GA	1,65	2,08	2,89	3,35	3,21	4,61	5,36	5,59	5,20	4,71	4,03
3GC	1,56	2,05	2,87	3,35	3,17	4,58	5,31	5,49	5,05	4,60	3,91
4AA	1,38	1,74	2,27	2,48	1,74	2,26	2,41	2,42	2,35	2,20	2,03
4AC	1,85	2,65	3,85	4,42	3,69	4,69	4,88	4,77	4,22	3,68	3,14
4BA	1,76	2,48	3,53	4,02	3,39	4,33	4,49	4,33	3,86	3,44	2,92
4BC	1,75	2,41	3,39	3,82	3,12	3,89	4,08	4,01	3,62	3,22	2,78
4R	2,02	2,95	4,60	5,60	5,79	7,66	8,86	8,83	7,80	6,45	5,17
4FA	1,76	2,54	3,84	4,63	4,24	6,12	7,01	6,95	6,16	5,30	4,31
4FC	1,73	2,51	3,84	4,63	4,32	6,10	6,89	7,03	6,23	5,32	4,38
4GA	1,88	2,68	3,99	4,71	4,15	5,60	6,07	5,97	5,29	4,48	3,78
4GC	1,84	2,59	3,85	4,55	3,94	5,31	5,76	5,74	5,15	4,43	3,72
70/100-RTFOT	1,21	1,46	1,83	2,04	2,04	2,40	2,49	2,39	2,17	1,97	1,78
650/900	0,08	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,06		
70/100	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Taulukko F. 2. $\Delta\delta$ -arvot ($\delta_{70/100}$ - $\delta_{\text{vanhentunut näyte}}$) taajuudella 1,78 Hz eri lämpötiloissa.

Näyte	0°C	10°C	20°C	25°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
	[°]	[°]	[°]	[°]	[°]	[°]	[°]	[°]	[°]	[°]	[°]
1AA	1,44	4,45	5,69	5,98	4,64	5,19	4,04	2,29	1,30	0,60	0,18
1AC	7,21	11,55	13,13	12,75	10,42	9,84	7,80	5,02	3,01	1,86	0,77
1BA	10,20	14,99	18,08	18,19	16,20	15,08	12,46	8,58	5,24	3,00	1,21
1BC	10,24	15,34	18,31	18,19	15,67	14,57	11,92	8,12	4,96	2,88	1,33
1R	10,46	15,39	18,81	19,11	17,91	16,57	14,16	10,32	6,57	3,95	1,99
1FA	7,41	11,33	13,70	13,94	12,23	11,99	9,97	6,75	4,12	2,46	1,27
1FB	7,17	11,18	13,20	13,07	11,82	11,05	9,14	6,14	3,78	2,26	0,97
1FC	6,33	10,66	12,51	12,43	10,72	10,36	8,44	5,53	3,33	2,04	1,04
1GA	7,67	12,02	14,46	14,62	13,08	12,59	10,54	7,15	4,36	2,57	1,24
1GC	5,89	10,05	12,02	12,08	10,70	10,55	8,68	5,69	3,43	2,00	0,84
2AA	8,46	14,04	17,70	18,17	16,52	15,45	12,86	8,83	5,29	3,14	1,67
2AC	11,60	17,50	21,55	21,98	20,11	18,58	15,70	11,36	7,19	4,22	1,99
2BA	11,88	17,80	22,19	22,95	21,94	20,07	17,23	12,80	8,33	4,87	2,53
2BC	11,19	17,38	21,74	22,33	20,45	18,88	16,07	11,71	7,54	4,49	2,33
2CA	13,19	19,18	23,74	24,65	23,74	21,99	19,02	14,36	9,53	5,67	3,04
2CC	12,97	19,25	24,10	24,98	24,00	21,92	18,92	14,28	9,53	5,82	3,23
2DA	10,64	16,01	20,02	20,74	19,75	18,34	15,72	11,56	7,45	4,45	2,49
2DB	12,28	18,36	22,74	23,30	21,20	20,15	17,32	12,82	8,30	4,91	2,50
2DC	10,95	17,01	21,40	22,11	20,82	19,27	16,49	12,04	7,65	4,53	2,35
2R	12,99	19,17	24,04	25,28	24,80	23,76	21,42	16,98	11,96	7,54	4,07
2FA	8,95	13,76	16,72	16,95	15,07	14,69	12,60	9,09	5,77	3,39	1,66
2FC	9,71	15,13	18,46	18,65	17,41	16,09	13,84	10,19	6,53	3,90	1,98
2GA	9,42	14,35	17,31	17,38	15,80	14,80	12,80	9,47	6,05	3,58	1,68
2GC	9,37	14,29	17,43	17,49	15,49	14,79	12,83	9,39	6,09	3,74	1,71
3AA	3,58	7,00	9,48	10,18	9,17	10,24	9,18	6,53	4,17	2,40	0,90
3AC	6,75	10,28	12,52	12,76	11,58	11,93	10,59	7,72	5,01	3,13	1,21
3BA	5,77	9,14	11,53	12,11	11,27	12,50	11,96	9,28	6,25	3,86	1,83
3BC	5,25	8,69	11,20	11,84	11,36	12,19	11,34	8,59	5,80	3,50	1,78
3R	8,09	12,01	14,79	15,51	15,07	15,70	14,79	11,78	8,28	5,38	2,89
3FA	5,32	8,18	10,02	10,53	9,87	10,96	10,45	7,97	5,35	3,18	1,62
3FC	5,23	7,91	9,66	10,08	9,22	10,37	9,81	7,53	5,05	3,18	1,64
3GA	6,24	9,29	11,45	11,89	11,28	11,84	10,70	7,88	5,19	3,23	1,58
3GC	5,98	9,60	11,98	12,44	11,46	12,09	10,80	7,88	5,11	3,15	1,48
4AA	6,00	9,61	10,78	10,36	7,70	7,25	5,56	3,28	1,92	1,16	0,23
4AC	9,00	13,66	15,65	15,09	12,45	11,10	8,65	5,58	3,27	1,90	0,46
4BA	8,60	12,97	14,72	14,16	12,03	10,40	8,07	5,12	3,02	1,82	0,57
4BC	8,62	13,04	14,71	14,02	11,10	10,04	7,78	4,90	2,89	1,70	0,61
4R	9,86	14,46	17,56	17,94	16,90	15,92	13,71	9,80	6,24	3,65	1,74
4FA	8,43	13,19	16,21	16,59	15,17	14,65	12,46	8,72	5,41	3,25	1,61
4FC	8,57	13,60	16,74	17,04	15,62	14,92	12,53	8,82	5,45	3,24	1,69
4GA	8,83	13,26	15,76	15,75	13,68	12,83	10,48	7,02	4,24	2,47	1,17
4GC	8,98	13,64	16,24	16,18	14,19	13,07	10,66	7,17	4,38	2,62	1,11
70/100-RTFOT	3,83	6,74	8,13	8,47	7,94	7,29	5,70	3,42	1,90	1,08	0,00
650/900	-27,6	-25,61	-20,66	-17,64	-15,46	-8,92	-6,36	-3,28	-1,54		
70/100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Liite G: Vaihekulmien erot samassa jäykkyydessä

Taulukko G. 1. $\Delta\delta$ -arvot ($\delta_{70/100} - \delta_{\text{vanhentunut näyte}}$), kun vaihekulmia on verrattu eri jäykkyyksillä.

Näyte	$\Delta\delta$ ($G^*=10^4$ Pa) [°]	$\Delta\delta$ ($G^*=10^5$ Pa) [°]	$\Delta\delta$ ($G^*=10^6$ Pa) [°]	$\Delta\delta$ ($G^*=10^7$ Pa) [°]	$\Delta\delta$ ($G^*=4 \cdot 10^7$ Pa) [°]
1AA	3,52	5,20	5,76	5,15	5,62
1AC	2,49	5,28	5,87	4,58	4,33
1BA	2,95	6,09	6,03	6,18	5,06
1BC	2,95	5,83	5,98	6,63	5,60
1R	3,34	7,21	6,21	6,74	5,33
1FA	3,44	5,66	6,53	4,07	3,43
1FB	3,16	5,60	6,38	4,32	3,77
1FC	2,97	5,94	6,35	4,53	4,02
1GA	3,71	5,95	7,19	4,67	3,93
1GC	3,33	6,71	6,81	4,70	3,98
2AA	4,69	7,75	10,02	7,38	5,91
2AC	3,47	8,35	7,89	8,57	6,97
2BA	4,33	9,66	8,66	9,19	7,30
2BC	4,54	9,24	9,53	9,69	7,51
2CA	4,25	7,77	8,92	8,53	6,84
2CC	4,37	8,14	9,10	9,19	7,61
2DA	4,53	8,88	8,81	8,13	6,23
2DB	4,27	9,39	8,73	9,63	7,77
2DC	4,62	9,60	9,86	9,58	7,38
2R	6,05	9,60	10,57	9,19	7,08
2FA	4,36	6,92	7,20	6,03	4,96
2FC	4,46	7,70	8,21	7,14	5,80
2GA	4,47	6,96	7,30	6,01	4,97
2GC	4,64	7,05	7,25	6,33	5,14
3AA	4,02	6,90	5,58	2,90	2,15
3AC	4,08	5,58	5,69	2,81	2,30
3BA	5,79	7,17	5,98	2,71	2,00
3BC	5,16	6,80	6,14	2,59	1,84
3R	5,39	8,25	6,35	3,91	2,89
3FA	4,60	5,78	4,63	1,50	1,34
3FC	4,42	5,89	4,63	1,85	1,61
3GA	4,31	5,82	5,62	2,31	1,86
3GC	4,35	6,02	5,86	2,86	2,27
4AA	1,94	5,43	4,76	3,46	3,32
4AC	2,33	4,33	5,95	5,03	4,67
4BA	2,07	4,12	6,19	4,57	4,40
4BC	2,05	4,40	5,61	4,77	4,55
4R	3,71	7,22	6,53	6,08	4,95
4FA	4,03	6,76	7,36	5,53	4,45
4FC	4,05	6,91	7,60	6,06	4,86
4GA	3,33	5,25	6,04	4,94	4,25
4GC	3,55	5,68	7,00	5,57	4,74
70/100-RTFOT	2,00	5,35	4,56	2,33	2,10
650/900	-1,22	-3,69	-7,22		
70/100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Liite H: G-R-parametrin arvot.

G-R-parametrien arvot laskettiin kompleksimoduulin ja vaihekulman avulla alla olevalla kaavalla. Kompleksimoduulin ja vaihekulman arvot määritettiin Master-käyrien avulla lämpötilassa $T = 15\text{ °C}$ ja kulmataajuudella $\omega = 0,005\text{ rad/s}$. Taulukkoon H.1 on kerätty G-R-parametrin, kompleksimoduulin ja vaihekulman lisäksi siirtokertoimen arvo, jonka avulla kompleksimoduulien ja vaihekulmien arvot on määritetty.

$$G - R - \text{parametri} = \frac{G^*(\cos \delta)^2}{\sin \delta}$$

Taulukko H. 1. G-R-parametrien arvot sekä parametrin laskemiseen käytetyt arvot.

Näyte	$a_T (T=15\text{ °C})$ [-]	Complex Modulus, G^* [Pa]	Phase Angle, δ [°]	G-R [Pa]
1AA	3,5	2,40E+04	72,6	2,25E+03
1AC	3,8	1,10E+05	66,5	1,91E+04
1BA	3,9	2,90E+05	60,9	7,85E+04
1BC	3,8	2,70E+05	60,9	7,31E+04
1R	4,1	3,10E+05	60,9	8,39E+04
1FA	3,8	1,40E+05	65,6	2,62E+04
1FB	4	1,10E+05	66,5	1,91E+04
1FC	3,7	9,10E+04	66,5	1,58E+04
1GA	3,9	1,50E+05	64,5	3,08E+04
1GC	3,8	8,30E+04	66,5	1,44E+04
2AA	3,6	2,00E+05	60,9	5,41E+04
2AC	3,9	4,60E+05	58	1,52E+05
2BA	4,1	4,90E+05	56,3	1,81E+05
2BC	3,8	4,10E+05	56,3	1,52E+05
2CA	4,2	7,10E+05	56,3	2,63E+05
2CC	4,1	7,10E+05	54,5	2,94E+05
2DA	3,9	3,50E+05	59,5	1,05E+05
2DB	4,1	5,30E+05	56,3	1,96E+05
2DC	3,9	3,90E+05	56,3	1,44E+05
2R	4,3	7,50E+05	54,5	3,11E+05
2FA	4	2,00E+05	62,2	4,92E+04
2FC	3,8	2,70E+05	60,9	7,31E+04
2GA	3,8	2,40E+05	62,2	5,90E+04
2GC	3,8	2,30E+05	62,2	5,66E+04
3AA	3,6	6,10E+04	68,2	9,06E+03
3AC	3,9	1,20E+05	66,5	2,08E+04
3BA	4	9,70E+04	65,6	1,82E+04
3BC	3,9	9,00E+04	65,6	1,69E+04
3R	4,2	1,80E+05	62,2	4,43E+04
3FA	4	7,90E+04	67,4	1,26E+04
3FC	4	7,00E+04	67,4	1,12E+04
3GA	4	9,80E+04	66,5	1,70E+04
3GC	3,9	1,00E+05	65,6	1,87E+04
4AA	3,6	6,00E+04	69,7	7,70E+03
4AC	3,9	1,80E+05	64,5	3,70E+04
4BA	3,9	1,60E+05	66,5	2,77E+04
4BC	3,8	1,60E+05	66,5	2,77E+04

Näyte	a_T (T=15 °C) [-]	Complex Modulus, G^* [Pa]	Phase Angle, δ [°]	G-R [Pa]
4R	4,1	2,50E+05	60,9	6,77E+04
4FA	3,8	1,90E+05	62,2	4,67E+04
4FC	3,8	2,00E+05	62,2	4,92E+04
4GA	3,8	1,90E+05	63,4	4,26E+04
4GC	3,9	1,90E+05	62,2	4,67E+04
70/100	3,7	1,40E+04	79,7	4,55E+02
70/100-RTFOT	3,8	4,30E+04	72,1	4,27E+03
650/900	3,3	1,60E+02	85,9	8,20E-01